导　言

仅仅是1996年和1997年的自然科学及技术出版物的数量，就超过了自有文字传播以来到第二次世界大战为止，世界上所有学者的相关著述的总和。如此大的知识量不仅使外行望而却步，就连专家也很难了解自身学科的全貌。在这种背景下，我们该如何确认哪些知识是有价值的，它们应怎样发展，会对我们产生什么影响？就显得尤为重要。因为正是自然科学与我们生活的各个方面息息相关，即便我们毫无察觉，但我们却无时无刻地要与它打交道。

本丛书旨在作为茫茫知识海洋中的航标，导引我们遨游自然科学和技术研究的最为重要的专业领域；文笔通俗易懂，重点放在基础性、关键性的知识和理论，并且自始至终刻意地省略了艰深的细节问题。

担纲本丛书写作的是一些杰出的科普作家，他们的日常工作就是用深入浅出的语言向人们讲解复杂深奥的科技内容。我感谢他们每个人，感谢他们对这一项目表现出来的自告奋勇精神和富有创造性的合作。

量子物理曾经长期被打入“冷宫”，正因如此，爱因斯坦的那句评论语“上帝不掷色子”成了经典之言。事实上，也的确难以令人置信，在我们这个感官能够感知的世界里存

在着各种固定的、不可动摇的自然现象，而在它们的背后，在微观世界里，占主导地位的竟然是只能通过统计数才能领悟的偶然性定律。布里吉特·罗特莱因（Brigitte Röthlein）以极为生动的方式向我们揭示，量子理论家是如何成功地将他们的思想大厦建筑在物理学之中的。这条漫游之路从拥有数百年历史的光的本性是波还是粒子的争论开始，经过普朗克、薛定谔、玻尔、海森堡或者费因曼，在目前的驿站中停留的是一些正在改变我们日常生活的技术，而首当其冲的是应用前景无比广阔的激光技术。

奥拉夫·本钦格尔

布里吉特·罗特莱因

出生于1949年。物理学硕士毕业；1979年又获得了新闻学、教育学和自然科学史博士学位。她主要的兴趣在于基础理论研究。自1973年以来，她为各种报纸和杂志以及电视和电台撰写科学文章。1993年至1996年，她在自由撰稿之余还办了一份名为《当时》的历史杂志。主要著作有：《破译大脑的秘密》(1993)、《静谧的月亮海——1969年7月20日的科技革命》(1997)、《物质的最深处——核物理学导引》(1998)、《薛定谔的猫——玄奥的量子世界》(1999)等。

前沿科学探索书系

蓝色的星球——人与生态

生命的分子——神奇的遗传学

知识与感知——探究人类的大脑

薛定谔的猫——玄奥的量子世界

关于鹦鹉螺和智人——进化论的由来

混沌及其秩序——走近复杂体系

超弦的音响——自然中之最小

$E=mc^2$ ——相对论入门

物质的最深处——核物理学导引

黑洞与彗星——天文学大观

逻辑的语法——数学漫谈

元素的轨迹——化学奇境

目　录

一只猫名扬天下

这一招也许会出自某个动物虐待狂之手：假设有一只既不能窥视、也不会向外界传播声音的箱子。箱子里面放一只猫，它健康而又活泼，对自己眼下处于何种困境却一无所知。因为箱子里的这只猫的身边放着一台意味着它必死无疑的物理仪器：一种放射性的制剂将在随后一小时内的某一时刻发生原子蜕变。惟独不详的是，蜕变会发生在这一小时内的哪一时刻。原子蜕变一旦发生，它就会通过盖革记数器释放电脉冲，脉冲致使一把锤子落到一只含毒的管瓶上。此时此刻将发生的事意味着这只猫走到了生命的尽头：锤子砸碎玻璃管瓶，毒素即刻外溢并挥发，猫闻到毒素后随即一命呜呼。然而这里面所发生的一切，在外面既看不见，也听不到或者感觉不到。甚至于最认真观察的人也无法断定，箱内的核蜕变是否已经完成，或仍然需要等候。因为放射性元素的一个特性是，其原子不是在某一特定的时间点，而只是以某种概率在一特定的时间段内发生蜕变。换句话说，一个特定原子的蜕变在时间上是不可以准确预报的。人们只能用如下类似的话来表述：它极有可能就在未来的一小时之内发生。

对箱子里的猫来说，这意味着什么呢？在可能发生

蜕变的这一小时里，在外面观察的人中间无一人能说，猫此时仍活着或已经死了，原因是没有谁知道原子蜕变的准确时间。从某种意义上说，此时这只猫生与死并存，或两者都无从谈起。它处于一种介于生与死之间的混合状态之中。诚然，我们每时每刻都可以打开箱子，看一看，猫究竟是仍活着，还是已经死了。

值得这只猫庆幸的是，这仅仅是奥地利物理学家薛定谔(Erwin Schrödinger)于 1935 年的一次想像中的实验。薛定谔想通过这种方式举例说明，其实我们整个世界都带有这种不确定因素。薛定谔是量子力学的鼻祖之一。量子力学是一门以数学方式描述和解释微观粒子领域运动过程的科学。在这个微观世界里发生的全是些极为光怪陆离的事：在这里粒子可同时分布在几个不同的位置，它们相互之间能以超过光速的速度沟通，或无需过渡从一处跃至另一处。薛定谔通过其猫的形象悟出了一个道理，一个极为复杂的思维过程采用通俗的方法来描述，是能为众人所理解的。这或许就是他的猫何以如此闻名遐迩的缘故。

尽管量子力学理论可以用来真实地描述我们日常生活中的现实世界，但事实上，它仅在极少的有限的范围内有效；一旦在宏观尺度即我们现实的宏观世界中，量子物理学的规则，至少在普通情况下，是并不适用的。

恰恰正是由于人们难以理解这门复杂的科学，因此薛定谔用猫进行虚构的实验，其目的是想让量子力学的基本原理在外行面前也变得浅显易懂。这一原理要说明

的是，世上的万物，无论是粒子，是光或者是力，其实都是不确定的。没有哪一个粒子能在特定的时间又正好处在特定的位置；没有哪一道光仅仅在这里，而非同时又在另一个地方；甚至真空或者说绝对的虚空也存在着许许多多的微粒和波。一旦进行测量，这种奇特的、未知的、既模糊又不确定的世界，顿时就会转变为我们习以为常的、确定的可知世界。当人们在使用测量仪器的一瞬间，现实就会变得能够得到精确的描述，这是自著名学者牛顿以来一直为人熟知的。对于那只猫而言，那个打开这只箱子朝里面张望的观察者就是"测量仪器"。

或许可以这么说，测量仪器改变着世界。它们变不确定因素为确定因素，变模糊状态为精确数据。虽然这种想法听起来异乎寻常，但它已着实令不少科学家绞尽脑汁，而且迄今仍不能有效地解释。尽管如此，往日关于量子力学以及它对现实解说的各种争论并非徒劳无益。它们引发了大量创造性的思维。实验物理学家再也憋不住了，未等他们想出该对这些罕见的预言进行检验的方案，不少科学家就开始着手具体的实验，想让薛定谔的猫成为现实。于是从中掀开了现代物理学领域最惊心动魄的篇章之一，时至今日它尚未完全告终。

薛定谔利用他自己描绘的介于生和死之间的猫这一形象，不仅想形象地说明量子力学的基本原理，而且想袒露他的疑惑，因为一旦他想起世界其实是建筑在某种不确定因素之上的时候，一种奇特的感觉便油然而生。天才的丹麦理论家玻尔（Niels Bohr），即建立玻尔原子模型

的功臣，在许多讨论中同样也探索了这个问题。他曾在给予薛定谔答复时这样说，要进行测量非得采用宏观测量仪器不可。这种必须遵循经典物理学定律的仪器，破坏了量子状态的叠加，它使得量子状态衰陷。关于经典物理学和量子物理学之间过渡的解说，被称为“哥本哈根学说”。

然而，巴黎高等师范大学研究小组，于 1996 年首次成功地进行了一次实验，实验期间采用的那台测量仪器并非宏观仪器，就它本身而言，遵循的却是量子物理学的定律。这几位科学家仿效薛定谔，将这台仪器命名为“量子鼠”。阿胡席(Serge Harrouche)和雷蒙(Jean-Michel Raimond)利用激光脉冲将一个单独的铷原子同时激发到两种更高激发态之间。他们让该原子高速地穿过一个能立刻吸收原子振动的空腔，或者换言之，原子在空腔内产生共振。这种介于两种激发态之间的叠加态可以说相当于薛定谔那只半死半活的猫。于是，这两位法国研究人员开始检测这种不定状态在不同条件下的稳定性。为此他们还发明了一种精巧的测量仪器：它是由另一个原子构成的，研究人员让该原子穿越空腔，并同时监测它的振动。接着就可以在示波器里对其状态进行测定。阿胡席把第二个原子与一个量子鼠作比较，这个量子鼠可以在不开箱的情况下对薛定谔猫作监测。这只独创的量子鼠，并不像玻尔所认定的那样，是经典物理学的对立物，而仅仅由于其微小的体积，使得它本身就是量子物理学研究的对象。

实验结果表明，从量子状态过渡到经典物理态不是突然的，而是一个渐进的过程。第一个和第二个原子穿过空腔的时间差越大，测量时这种不定态已经结束的可能性就越大。研究人员的结论是：在微观世界向宏观世界过渡的同时，量子物理也在渐渐地向经典物理靠拢。观察的体系越庞大，在两种状态，如生与死之间的不定态的寿命就越短。在日常宏观物理现象中，也许我们根本不会遇到这类现象。

美国科罗拉多州博尔德的国家标准与技术所物理学家门罗（Chris Monroe）和温兰德（David Wineland）得出了一个与此相差无几的结果。他们同样利用激光脉冲，从一个铍原子身上得到了介于两种精细结构激发态之间的不定态。这一状态是因原子核外电子与原子核所产生电磁场相互作用而产生的。这一状态同原子在离子势阱中的振动联系在一起。门罗拿这种状态同一个坐在往返摇荡的秋千上的孩子作了对比。如果有一张瞬间照片的话，它将显示一个原子在同一时间可处于两个不同的位置。据美国研究人员的计算，这两个位置的间隔距离，大约为 80 毫微米（百万分之一毫米）。此时他们发现，那些耦合起来的半帧原子的间距越大，叠加状态重新消失的速度就越快。从这里也得出了这样一个结论，在我们现实世界的尺度中，不可能出现量子力学奇迹。

然而，80 毫微米是一段与当今正在计算机工业实验室里开发的电子电路数量级相去不远的距离。因此也许很有可能，计算机芯片进一步微型化有朝一日会将我们

带进量子物理的奇妙世界，然后在我们日常世界和薛定谔预言的微观事物中的那些不确定因素之间，建立一种直接的关系。

经典物理学宇宙观的变革

光——是微粒，还是波

对于绝大多数人来说，光是毋庸置疑、不言而喻的事，而对物理学家而言，光则是一种数百年来一直让人争论不休的研究对象。光也是进入量子物理殿堂的一把钥匙。光究竟是由波还是由微粒组成的，曾经一直是众多与光有关的中心问题之一。在这数百年的岁月里，有过不少学派，有这样猜测的，也有那样猜测的。两种理论的信徒之间时常展开激烈的论战。

17世纪初，莱顿数学教授斯涅耳(Welebrord Snellius)研究了光从一种媒质入射到另一种媒质，如从空气到水时的折射现象。在这期间，他于1621年发现了迄今为止依然有效的折射定律。折射定律表明，光在不同媒质中是以不同速度传播的。然而，这一定律一直到1637年才由笛卡儿(René Descartes)公布于众。笛卡儿致力于用光是由直线快速运动着的微粒子构成的这一假设，来解释光及其他光学现象。因此他也认为，光线的反射无非是光粒子在弹性面层上的反弹。几乎就在这同时，意大利波伦亚的数学家格里马第(Francesco Grimaldi)

选择了与此相反的光的波动论。在这之前，他观察到实际得到的影子总比光在直线传播情况下本应得到的要稍大一些，此外影子的边缘往往会出现彩色。这两种效应完全可以通过波动来加以说明，因为观察水波绕过障碍物时，也能得到类似的现象，所以格里马第认为，光是以极快的速度运动、同时快速振动的流体。

大约 300 多年前，荷兰科学家惠更斯（Christian Huygens）发展了格里马第的理论：但是，他认为这种被他称之为以太的流体是静止的，光的振动就如同水波那样在里面传播。以太应当是由微小的弹性微粒构成的，它能在不改变其位置的情况下传输脉冲，它布满了所有光的路径。当光穿过固体如玻璃时，光波必须绕过物体的微粒，这就使得它的传播速度下降。惠更斯就是通过这种方式来解释光的折射现象的。他于 1690 年在其《论光》一书里发表了这些见解。

围绕着这一理论，在他和英国学者牛顿之间展开了一场学术争论。这场争论是关于光的本质的最著名的争论之一。因为牛顿与惠更斯的观点相反，他和笛卡儿一样认为光是由微粒组成的。

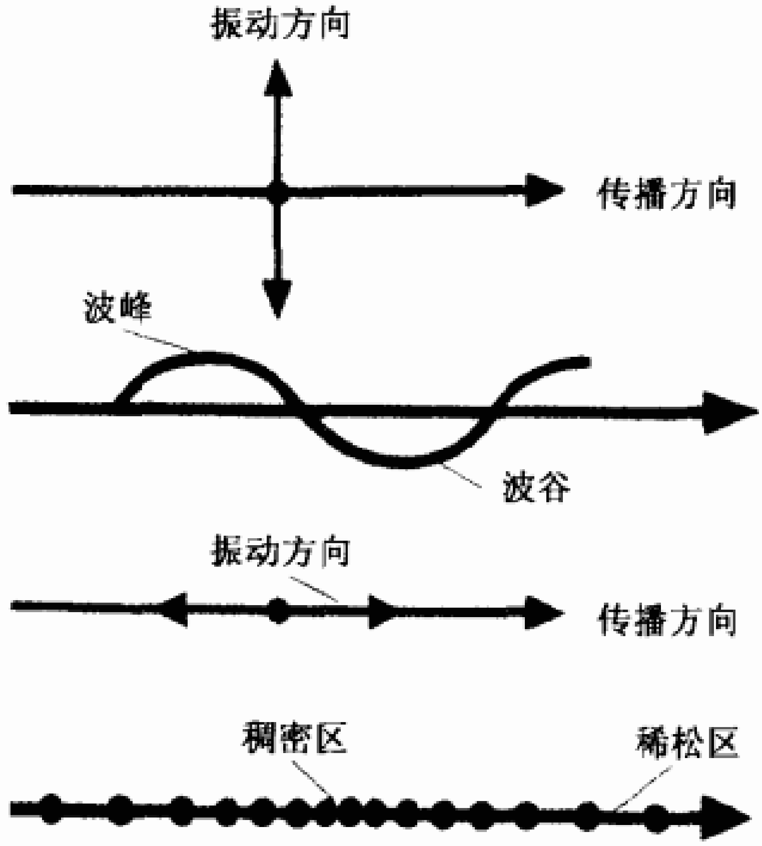
其实，牛顿对于光这一物质并不特别感兴趣，他倒是更热衷于天文学。作为一位优秀的观察者，他发现当时常见的由几组透镜组成的望远镜，在观测时其边缘总出现彩色的而且略微变形的图像。于是，他就开始研究这种现象。牛顿处事历来一丝不苟：他不仅于 1668 年设计了世界上第一台反射式望远镜，从而弥补了折射式望

远镜的不足，而且也开始对光自身作进一步的研究。牛顿凭借几个棱镜开始分解白光。这里有一只三棱镜，如果让白光射入，并穿透两个不平行的镜壁，白光就色散呈彩虹的颜色。如同经过魔掌一般，白光变成了有色光。牛顿锲而不舍，试图滤出像人们所说的彩虹色谱中的单色光，然后透过另一只棱镜再次展开。此时，他断定光谱不能再继续分解了。

1704 年，牛顿在其《光学》一书中发表了对实验结果的解释。他在书中认为，光是由直线运动的微小的物质构成的，这些物质在周围的以太里产生颤动。

惠更斯和牛顿之间的对立，将整个一代学者一分为二。争论的方式并非都是高雅的，有关国家的科学团体也在其中扮演了不怎么光彩的角色。然而，当时的这场论战并没有决出胜负，而就这么在牛顿的光的粒子论稍稍领先的情况下被人们忘却了。从这以后，光学领域整整一个世纪没有重大的新发现，而理论家则找到了物理学其他的可以工作的领域。光的本质到了 19 世纪初才重新列入议事日程。这时，对牛顿的观点有了进一步的突破，而人们也已不再相信以太了，这时人们认为光无非是由快速飞行的粒子组成的。

然而，德国自然哲学家以及英、法两国的学者，此时却开始反对牛顿的这些观点，许多新的实验，如双折射和偏振实验，得出了光是波这样一个结论。尤其到了 1817 年，当伦敦医生托马斯·杨(Thomas Young)发现光不是一种类似声波、振动方向与传播方向相平行的纵向振动，



纵向的和横向的波动形式

而是振动方向垂直于传播方向的横向振动的时候，许多以往神秘的现象得到了解释。

这些新的光波理论提出了以太——光的传播媒质——应具有哪些特性这样一个问题。当时那些学者所持有的不同的、甚至有一部分是冒险的设想之间的争论，是科学史上扣人心弦的一个篇章。要说起这话就一言难尽了。大约在19世纪中叶，光的波动理论最终得到了认可。在随后的数十年里，正当电和磁现象进入科学的视角时，英国物理学家麦克斯韦(Clerk Maxwell)产生了光可能是一种电磁现象的想法。他认为光是由同一种媒质

的横波组成的，也正是这种媒质导致了电和磁现象。后来他彻底放弃了对以太理论的研究，潜心钻研以太内部出现的波动式微扰而引申出的数学方程组。他的《麦克斯韦方程组》至今仍正确无误地描述着的光及其他电磁射线的行为，而且成为每一个现代物理学家必备的工具。

天平更加明显地偏向了光的波动论这一边。尽管如此，仍然留下一个难点：虽然对以太这种看不见的能传导波振动的媒质的假设帮助解释了许多现象，但它也引出了一些新的问题，比如难以理解的是，为什么它不妨碍宇宙中行星的运动。此外还有一些其他悬而未决的问题：比如人们不理解，为什么当物质燃烧时火焰先红后黄，最后呈现白色。根据光的波动论，任何一种炽热的物质不一定会发出可见光，而可能是紫外线或 X 射线。

自 1889 年起，普朗克(Max Planck)在柏林担任物理学教授，他找到了解决这个问题的数学答案，其方法是假设燃烧物的原子不是连续地，而是以一小份一小份能量的形式发射出光的。他称这种能量为量子。量子的能量会随着光的频率而改变，蓝颜色量子的能量比黄颜色的或红颜色的更充足。从他的运算中得出了一个新的普遍有效的物理常数，普朗克把它称作基本有效量子，并用字母“h”命名，也即后来人们所说的普朗克常量。这是一个微小的数字，其数值约等于 6.6×10^{-34} 焦耳·秒。在实际应用中，人们也经常用修正了的普朗克常数 $\hbar$，其数值为 $h/2\pi$，来测量角动量。量子可比拟为小团体或微粒，但所有这一切都仅仅是虚构的图像。正如银行的自动取

款机只会输出若干个50马克的整数倍的款项一样，能量也只能在特定的条件下以某种特定大小的量子形式表现出来。我的账户所显示的金额绝不可能正好被50整除，然而我的钱在自动取款机里已被量化。这与光是完全一样的，当它被原子吸收或发射时，必须经过量化。1900年12月14日，普朗克在柏林向德国物理协会陈述了他的这一理论。他的这一论说精辟地解释了观察到的现象，但其实际意义当时尚未引起注意。20年之后，普朗克在出席诺贝尔奖颁奖仪式时所作的报告中这样解释道："即便辐射公式可以被认定是绝对精确的，但它仅意味着侥幸猜到了数学公式，因而只掌握非常有限的数值。因此，我从提出这一公式之日起便致力于赋予它真正的物理意义的工作……直至经过几周我一生中最紧张的工作之后，天空露出一丝白光，一道新的意想不到的曙光开始破晓。"

在爱因斯坦（Albert Einstein）1937年与尹费尔德（Leopold Infeld）合作撰写的《物理学的进化》一书里，这两位学者更为详尽地阐述了这一新的思想："……我们现在不得不假设，同种光是由能量'微粒'组成的。如果真是这样的话，老的（牛顿）学说的光粒子就可以由光量子来替代，我们想把这些光量子叫做光子。这些物质是一些小型的能量单位，它们以光的速度穿越空间。光量子理论的提出在某种意义上使得牛顿理论获得了新生。不仅物质和电荷具有一种'粒子'结构，对辐射能来说同样如此，这就是说，辐射能也是由量子即光子组成的。能量

子这一想法是本世纪初由普朗克首次引入物理学的，他试图以此来解释某些现象。”

光，或者更笼统一点说，能是量化为一小份一小份的；这种又一次打破光这一实体总体形象的想法，就连普朗克起先也未曾预料到。后来，只有爱因斯坦才雄辩地向世人表明，这种对许多人来说似乎是荒谬的设想可以解释光的本质。他在这种假设的基础上做了大量重要的工作。其中之一，同时也是他最终为此而于1921年获得诺贝尔奖的，是他对所谓光电效应的解说。爱因斯坦的同事勒纳德（Philip Lenard）曾断定，光在一定的条件下能够在金属表层击发出电子。勒纳德的一系列测试结果的惊人之处在于，随光源亮度的增强虽然能够击发出更多的电子，但是这些电子的速度不会加快。这与入射光的频率有关——频率越高，电子速度越大。此外，勒纳德对极少量的光就足以从金属表层击发电子这一事实感到惊讶。这个问题凭借经典物理的观点是解释不了的。为了对这些实验结果作一解释，爱因斯坦于1905年论定：光能是以 $h \cdot \nu$ 为值的量子形式（后称光子）在空间传播的（这里的 h 表示普朗克常量，ν 表示光的频率），并以同样形式被原子中的电子吸收。

如果同样大小的能束遇到电子，能束每次都会给这些电子相同的能量，因而也给了它们相同的速度。稍强一点的光仅表示在单位面积上出现的光子较多，但这些量子的能量不发生变化。因此当光度略强时从金属表层击出的电子虽然比较多，但是其速度不会加快。最低的

强度也足以引发光电效应，这同样可以用量子假设来解释：其实，一个单一的光子就足以能够击发出一个电子。若改变光的频率即它的颜色，光子的能量就不一样了，因此击发出来的电子的速度也随之改变。所以爱因斯坦能够完满地解释勒纳德实验中的出现的所有现象。

然而，爱因斯坦知道他的假设引人注目。他的同行在接受这一假设的同时仍表现出极大的怀疑，普朗克恰巧也在其中。1913 年，普朗克在爱因斯坦加入柏林科学院时说："爱因斯坦在诸如光子的假设等众多的推测中，偶尔也有些过分，这一点人们也许不会太在乎，因为没有一点冒险精神，精辟的科学领域中间也不会引出真正的革新。"现在我们知道，当时误解的是普朗克。

不久又有实验证实了爱因斯坦的理论。美国物理学家密立根（Robert A. Milikan），一位天才的实验家，在 1914 年间对光电效应作了多次高精度的实验，这些实验极为精确地证实了爱因斯坦的预言。

尽管当时老一代科学家持坚决反对的态度，但是人们还是不得不逐渐地承认，光一方面可视为波动，同时也确实是由微粒组成的。然而等到年轻一代的研究人员能够严谨地、坚定不移地与这些习惯思维决裂并进行改革时，时间又经历了若干年。

玻尔原子模型

能是经过量化的，并且是一份一份出现的设想，虽然

起初没能普遍认可，但它唤起了一些天才人物将它与其他一些思维模型结合。其中之一就是当时尚未完全成熟的原子模型。

1911年，新西兰物理学家卢瑟福(Ernest Rutherford)根据一些实验结果提出了一种原子模型，这种原子模型的基本观点是原子质量的绝大部分集中在原子核里。那里也有与很轻的负电子数量相当的正电荷，这些负电子像行星绕着太阳那样绕着原子核转动。正核子和这些负电子之间的电引力将原子聚合在一起，抵消了离心力。如果是这么一种模型，根据电动力学经典理论，旋转的电子必然持续不断地辐射出能量，因而很快就会减速，然后落入原子核。卢瑟福也许已经认识到了这一点，但他却没有进一步关注此事。两年之后，丹麦物理学家玻尔提出了一种解决这个问题的方法。他所假设的完全有悖于健康人的理智，因此遭到了包括他的一些同行在内的人们的坚决否定。玻尔认为电子只能在某些特定的轨道上运动，在这些轨道上电子不向外辐射能量。在靠得较外面的那些轨道上，电子拥有的能比在靠得较里面的轨道上的要多。这些轨道的特性是，电子的角动量是$\hbar$值的若干个整数倍。电子只能在这些轨道上运行，而不能在任何其他轨道上运行。但是，它们可以在这些轨道之间来回跃迁。在此期间，它们要么吸收能量(如果由里向外跃迁)，要么释放能量(方向相反)。一条条轨道能级之间的差应当正好分别相当于一个量子。一个原子，或更确切地说，它的电子只能吸收和放射特定频率

的光。

有这么一种奇怪的设想：电子以在某一轨道上突然消失，又在另一轨道上重新出现的方式，在轨道之间跳来跃去。此时，它们不再遵循电动力学的法则。劳厄（Max von Laue），著名的德国物理学家，愤怒地视其为无稽之谈，并且这么说道："这是在胡闹，麦克斯韦的方程组无论何时何地都有效，环形轨道上的电子肯定有辐射。"其实玻尔的原子模型纯属推测。但是可以看出，它能圆满地解释一些现在早已为人熟知，而以前却根本无法解释的实验结果，譬如氢元素和其他一些元素光谱线的排列。如果让阳光透过棱镜，阳光就如同牛顿所认识到的那样色散为七种自然光。若仔细地观察就能看到，这些颜色不够完整，有些地方存在深色线条。瑞士数字杂技艺人巴尔莫（Johann Jokob Balmer）为这些线条之间的距离，找到了一个在此之前一直不得其解的公式，这一公式是如何而来的，却始终是个谜。

玻尔的假设——按词的本义——黑暗中的光。如果根据他的原子模型，一个氢原子的电子能吸收的能量正好与深色线条的位置相符。事实上，这些线条产生的原因是，阳光穿透氢云，并激活了许多氢原子。它们从阳光中吸收量子，而且正好又是那些能级与电子轨道之间能量差相符的量子。人们称这一过程为吸收。在其余的到达地球的阳光里，缺乏的恰恰是这些光子，它们以黑色细线的形式在光谱中表现出来。由于这些线条刻画了氢原子的特征，人们也称其为氢原子谱线。

玻尔原子模型

物理学家玻尔创造发明了下列迄今为止仍部分有效的原子模型：

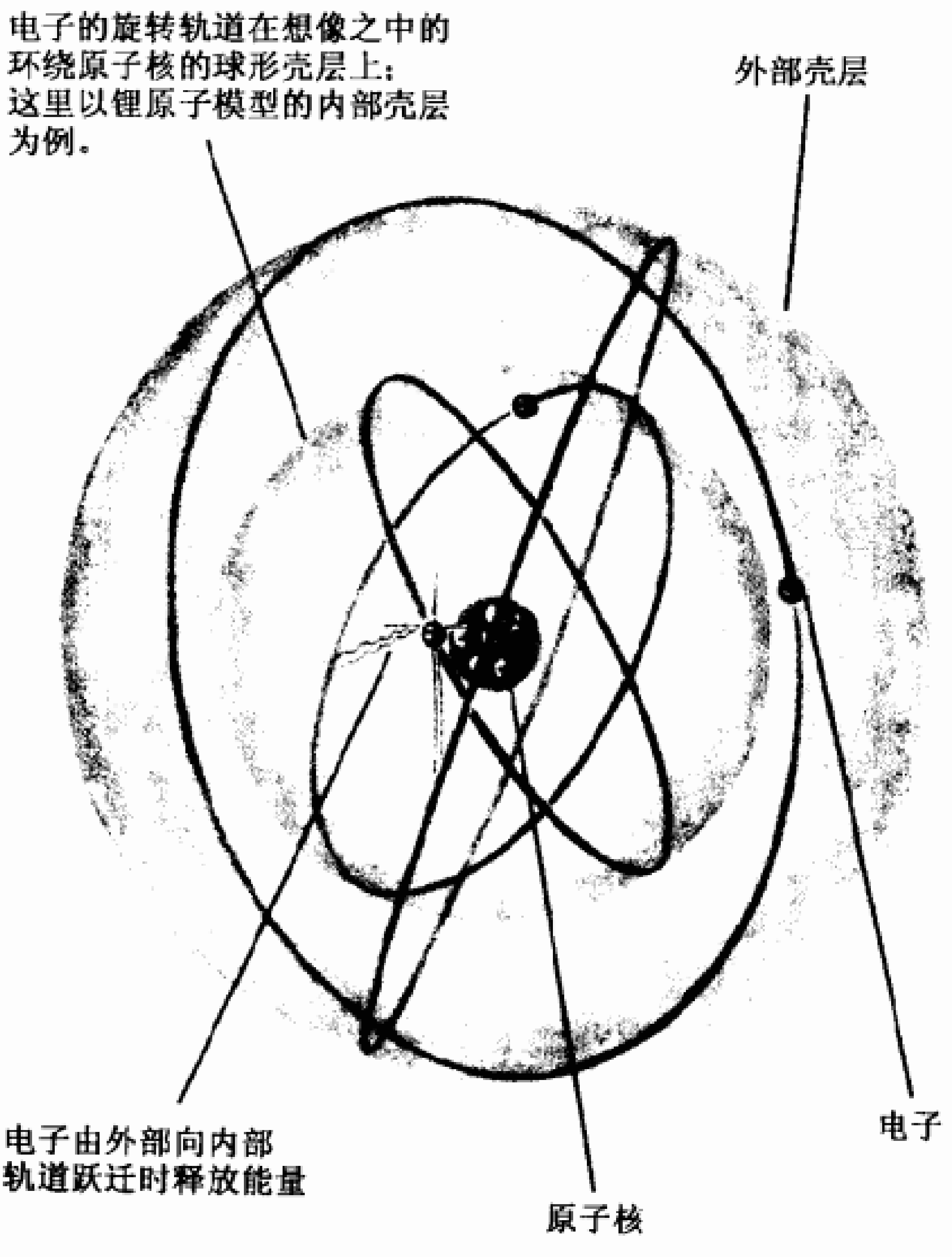
原子是由核和壳层组成的。原子核带正电荷，壳层由围着核旋转的电子组成。它们在轨道上运行，轨道上离心力和核的电引力之间，始终保持着平衡。然而对电子来说，只有在特定的轨道上才能够——背离经典物理学的预言——不丧失能量。这些轨道被称为量子轨道，外部轨道上的电子比在内部轨道上的电子具有更多的能量。

电子可以从一条能量轨道跃至另一条能量轨道。一个电子若从内部轨道跃至外部轨道，就必须为此吸收能量，若从外部轨道落入内部轨道，就释放能量。能的差别分别以所谓量子的形式被吞噬或释放，这些量子也被称为光子。玻尔通过他的假设能够解释诸如氢火焰为什么只能发射特定的光谱线也即只能发射特定频率的光。这些频率正好与不同轨道之间的跃迁相符。各种频率可按

$$E = h \cdot \nu$$

这一公式进行运算，其中 h 是个常数，被称为普朗克常数，ν 表示光子的频率。

玻尔原子模型


电子的旋转轨道在想像之中的
环绕原子核的球形壳层上；
这里以锂原子模型的内部壳层
为例。
外部壳层
电子由外部向内部
轨道跃迁时释放能量
原子核
电子

如果观察其他构造更为复杂的元素的原子，就会出现完全相似的过程。那里也会找到由于相关电子从白光中吸收了特定的光子而产生的特定的吸收线条。反之通过给原子增加能量，例如加温，也能激活原子发光而形成特定的发射线。原子壳层的电子吸收能量，然后跃迁至较高的轨道。不一会儿，它们又离开那些较高的轨道，重新返回较低的轨道。在这个过程中，它们释放它们那种特殊的可在光谱分析仪里进行测量的辐射。至今，验证混合材料中是否存在某种化学元素仍然还是采用这种非常灵敏的方法。

确切地说，玻尔原子模型的依据是纯粹的数字游戏。作家格里宾(John Gribbin)称它是一个拼凑而成的，融量子观点与经典物理学观点为一体的"大杂烩原子"。它能如此完美地解释光谱线，或许也可能是某种巧合。这一次又是爱因斯坦汇总了来自不同领域的思想，并从中获得了一些关于物理学的新见解。他此举为以数学方式描述物理学奠定了基础 。

自 20 世纪初以来，人们进一步研究了 1896 年才被柏克勒尔(Henri Becquerel)发现的一种惊人的现象：辐射蜕变。特定的元素在转换为另一种元素时释放粒子或辐射。这一被称为"放射现象"的过程掩盖着两种秘密：其一，人们不知这种作用的能从何而来；其二，人们从来不能预言原子何时蜕变。惟独能知道的是，在某一特定的时间段内，会有一半的放射性材料发生蜕变。这是根据统计数而得出的，因为即使是数量很小的物质也含有

多得难以计数的原子。这样原子的放射性蜕变就与极端不稳定因素连在了一起:它的时间点不可预报。当然,人们当时认为,这里面的原因仅仅是尚不知道蜕变的所有秘密,人们坚信,通过进一步研究总会有一天能找到蜕变的确切原因,藉此也能够准确地预报蜕变的时间点,因为“上帝不掷色子”,这就是爱因斯坦曾经说过的话——据我们今天所知,这根本是个误解。

爱因斯坦已注意到,玻尔原子模型表明了一种类似的机理:电子何时从某一轨道跃迁至另一轨道,从未得到过准确的预报。不知怎么地,能级之间的过渡看上去也只遵从统计规律。这与核蜕变完全一样。1916 年,爱因斯坦将他在这方面的想法放入一个数学公式,然后计算在让某种物质极端升温时这些公式会得出什么样的结果。其结果是:爱因斯坦利用这种方式得到的正好是普朗克公式,它是普朗克从一些完全不同的思维中引申出来的一个公式,该公式致使普朗克在 1900 年提出了量子这一假设。

有些特定的物理现象是没有具体起因的,它们惟独顺从偶然性原理,这种想法显示了一种对物理学而言全新的思维方式。它是在与最晚自牛顿以来一直被视为颠覆不破的定律的因由和作用主宰世界这一观点决裂。这一定律事实上今天对物理学仍然有效:假如说,我们对世界了解的程度已到了掌握着所有粒子的位置及其运动的程度,那么我们在理论上就可以从中对世界的状态将如何进一步发展作出准确的预报。在实践中我们对此却无能为力,原因只是为此必须要有大量的信息。但这并不存在原则

性的阻碍因素。这在量子物理学世界里就截然不同了。这里适用的是偶然性和概率定律，尽管爱因斯坦本人不相信这是最高的智慧，然而他还是同时在其数学计算中考虑到了这一点。只有那些在他的工作的基础上继续发展量子力学的物理学家们，才坚贞不渝地信奉这些“新的”定律。

量子数让世界有序化

玻尔原子模型和所有一切原子模型的设想一样，也只不过是针对某种更为复杂的事态的一种形象的观察方法。它列举了原子的一些特性，再用简化的演绎法加以解释。原子核被像那些在一些轨道上的行星那样的电子包围，原子核的情形与现实关系不大。然而，它——如我们已经看到的那样——非常圆满地解释了诸如氢的光谱这样的东西。

正如人们所知的，氢在所有的原子当中最为简单，它只有一个电子。根据玻尔模型，该电子在一条其角动量是 $\hbar$ 的若干个整数倍的轨道上运行，如果它吸收能量，就会跃迁至较高的轨道，然后返回。这些可能的轨道可以用量子数来表示。

首先是由里往外给电子的各个轨道逐一编号，并标上字母“n”。n 是主量子数，代表能级，它可以是 1，2，3，4 等数值。这一基本模型得到了进一步的完善。人们不仅学会了如何按不同的总能量将电子排列到不同的轨道上，同时也学会了按不同数值和方向的轨道角动量及

自旋角动量来排列电子。这样便产生了同样是整数的角动量量子数“l”,它可以从 0 到 n－1,它表示核周围的电子轨道形状。磁量子数“m”代表电子轨道由于外界磁场影响而选定的方向,在一个最简单的例子中,它包括－1,0 和 +1。最后是自旋量子数“s”,它的值是－1/2 或+1/2,人们可以形象地把电子想像成一些微小带电的球体在围绕着自身的轴线转动,转动时北极一会儿朝上,一会儿朝下,这种旋转被称为自旋。

这些数字就其本身而言并不意味着什么,它们只不过是用来制作顺序表的。然而,天才的物理学家泡利(Wolfgang Pauli)在 1925—1926 年间让这些数字获得了意义。起先,他只是通过无意识的实验断定,所有原子的光谱线都可以得到解释,条件是定出一条具有下述条件的定律:一个原子里不能有两个电子处于相同的量子状态,这就是说,在所有的量子数里面它们不能有哪一组相同。这个定律被称为“泡利原则”或“泡利不相容定理”。后来,这位研究者才又成功地以数学的方式,从量子力学里引申出了这一定理。这一定理论证了迄今为止仍起着良好作用的壳层模型。如同人们渐渐地认识到的那样,它不仅适用于电子,而且也适用于所有自旋数为半数的粒子。这些粒子按意大利物理学家费米(Enrico Fermi)的名字命名,称之为费米子,与按印度物理学家玻色(Satyendra Nath Bose)的名字命名的玻色子相对应。玻色子的自旋数为整数,它能以任意的数量停留在同一能级上——而且事实上也正是如此,因此这使得激光器的设

计在实践上成为可能。

按照泡利原理则相反，在原子最里面的轨道上（或在壳层内）只能存在两个电子：一个是朝上自旋的，一个是朝下自旋的。这样最里面的这个壳层就被填满了，其他的电子只能在较高一级的壳层内找到位置。氦原子最里面的壳层是满的，有两个电子。量子数将某种序列引入电子壳层的构造，使氢光谱到较重原子的光谱之间有个过渡。在原子最里面的壳层内——量子定律规定——n＝1。那么l＋m必须等于0。只有s还能包含数值＋1/2和－1/2。换句话来说就是：在这个最里面的壳层上只能有两个电子，这样的话，这个壳层就满了。适用于高一级的壳层即第二个壳层的是：n＝1和2，藉此l可以取数值1或2，m可取数值－1，0，＋1，s的两种可能性不变。第二个壳层里电子可系统地用下列组合来表示：

n	l	m	s
1	0	0	＋1/2
1	0	0	－1/2
2	0	0	＋1/2
2	0	0	－1/2
2	1	－1	＋1/2
2	1	－1	－1/2
2	1	＋1	＋1/2
2	1	＋1	－1/2

在第二个壳层上可以安置8个量子数组合各不同的电子，这样的话，这个壳层也满了。下面依此类推。如果按这些规定计算电子轨道的能级，就可以不成问题地预报光谱

线。如果接下去还要考虑原子核以它的电磁特性稍对壳层内电子的能量级进行“干扰”，那么光谱线会分散，这在以往的一些实验中已逐步充分得到证实。这里指的是精细结构。然而，远比解释原子光谱重要得多的是，这里阐述的规则可以解释元素周期及其化学反应。

元素周期——是由俄国人门捷列夫(Dimitrij Mendelejew)和德国人迈尔(Lothar Meyer)于1869年各自独立发现的——最早形成的原因是，人们当时是按原子重量来排列化学元素的，后来则按与原子核中正电荷数量一致的序号。由于同种原子每个壳层内负电子的数量每次都相等，因此元素也就按其电子壳层的结构来分类了。如果观察现今通用的周期表，就会发现化学特性相似的元素在一起，如惰性气体或卤素或半导体。基础表纵向各行列中分别是按8个元素一组排列的。就这点而言，它与理论是一致的，这相当于第二个壳层上的8个原子。但是，周期表的基本模式就不那么千篇一律了。第一周期只有氢和氦两个元素。第二和第三周期各包含8个元素，第四周期在第二个元素后被从钪至锌的10个所谓“过渡金属”中断。第五周期完全相似，被从钇到镉的另外10个过渡金属元素中断。第六周期中断两次：分别是被14个“稀土元素”(镧系元素)和另外10个过渡金属元素中断的。第七周期，也是最后一个周期的排列相似。过渡金属元素相互之间的化学特性非常相似。但它们也很容易区分。镧系元素则相反，它们过分相似，若要从化学上把它们分割开来非得花大力气不可。

如果现在将上述这些用于电子壳层结构的规则运用到一个个元素上，原子从里到外将被电子填上，与此同时，壳层将按其能量的顺序填满。在完全靠外的壳层上有一些特定的电子，它们的能量比在完全靠里的壳层上的电子略微少些，因此形成了过渡金属元素和镧系元素。在所提到的排列中间，同一竖排中两个相邻的元素原子最外层上具有相同数量的电子，藉此很容易产生物质的化学反应是由最外面的电子数量控制的猜想。

这里也再次出现了一种并非轻而易举就能得到的横向关系。量子数纯粹来源于数学和物理学方面的思考。然而，化学要研究的是原子如何反应以及原子如何与原子连接形成分子。为什么钠与氯经化合反应会生成食盐氯化钠？两个氢原子和一个氧原子聚合成水是怎么回事？为什么除惰性气体之外的所有气态元素在空气里都仅以两个原子组成一个分子的形式出现？原子的壳层模型对这一些以及类似的问题作了极为简单的答复。

事实表明，"填满了的壳层"比只是部分被占领的壳层稳定。因此比如说氢原子最外面的壳层里只有 1 个电子，它试图通过从别处再获得 1 个原子来填满这个壳层。它在构成水的时候成功了，其方法是将自己与 1 个氧原子（它的最外面的壳层里有 6 个电子）合并在一起同时另一个氢原子也与这个氧原子结合。这样可以说，原子共同"享用"它们各自最外面的电子。如此一来，每个氢原子有 2 个外层电子，氧原子有 8 个电子——一种多么稳定的状态。

现代元素周期表

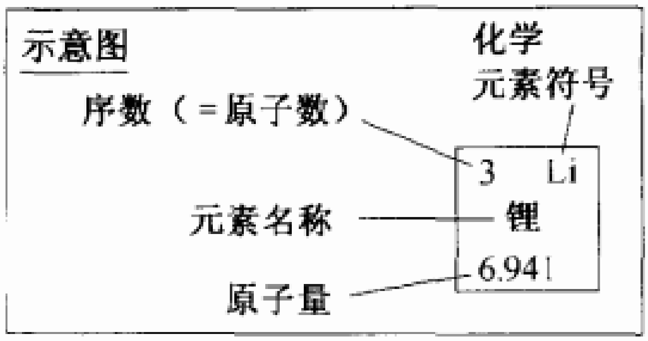
1 H 氢 1.00794								
3 Li 锂 6.941	4 Be 铍 9.0122							
11 Na 钠 22.9898	12 Mg 镁 24.305							
19 K 钾 30.098	20 Ca 钙 40.08	21 Sc 钪 44.956	22 Ti 钛 47.867	23 V 钒 50.942	24 Cr 铬 51.996	25 Mn 锰 54.938	26 Fe 铁 55.845	27 Co 钴 58.9332
37 Rb 铷 85.47	38 Sr 锶 87.62	39 Y 钇 88.906	40 Zr 锆 91.22	41 Nb 铌 92.906	42 Mo 钼 95.94	43 Tc 锝 99	44 Ru 钌 101.07	45 Rh 铑 102.905
55 Cs 铯 132.905	56 Ba 钡 137.27	57 La 镧 138.91	72 Hf 铪 178.49	73 Ta 钽 180.948	74 W 钨 183.84	75 Re 铼 186.207	76 Os 锇 190.23	77 Ir 铱 192.217
87 Fr 钫 223	88 Ra 镭 226.05	89 Ac 锕 227	104 Rf 𬬻 261	105 Db 𬭊 263	106 Sg 𬭳 264	107 Bh 𬭛 265	108 Hs 𬭶 267	109 Mt 鿏 268

镧系元素(稀土元素):

58 Ce 铈 140.12	59 Pr 镨 140.908	60 Nd 钕 144.24	61 Pm 钷 147	62 Sm 钐 150.36	63 Eu 铕 151.96	64 Gd 钆 157.25

锕系元素:

90 Th 钍 232.038	91 Pa 镤 231.036	92 U 铀 238.03	93 Np 镎 237	94 Pu 钚 239	95 Am 镅 241	96 Cm 锔 242

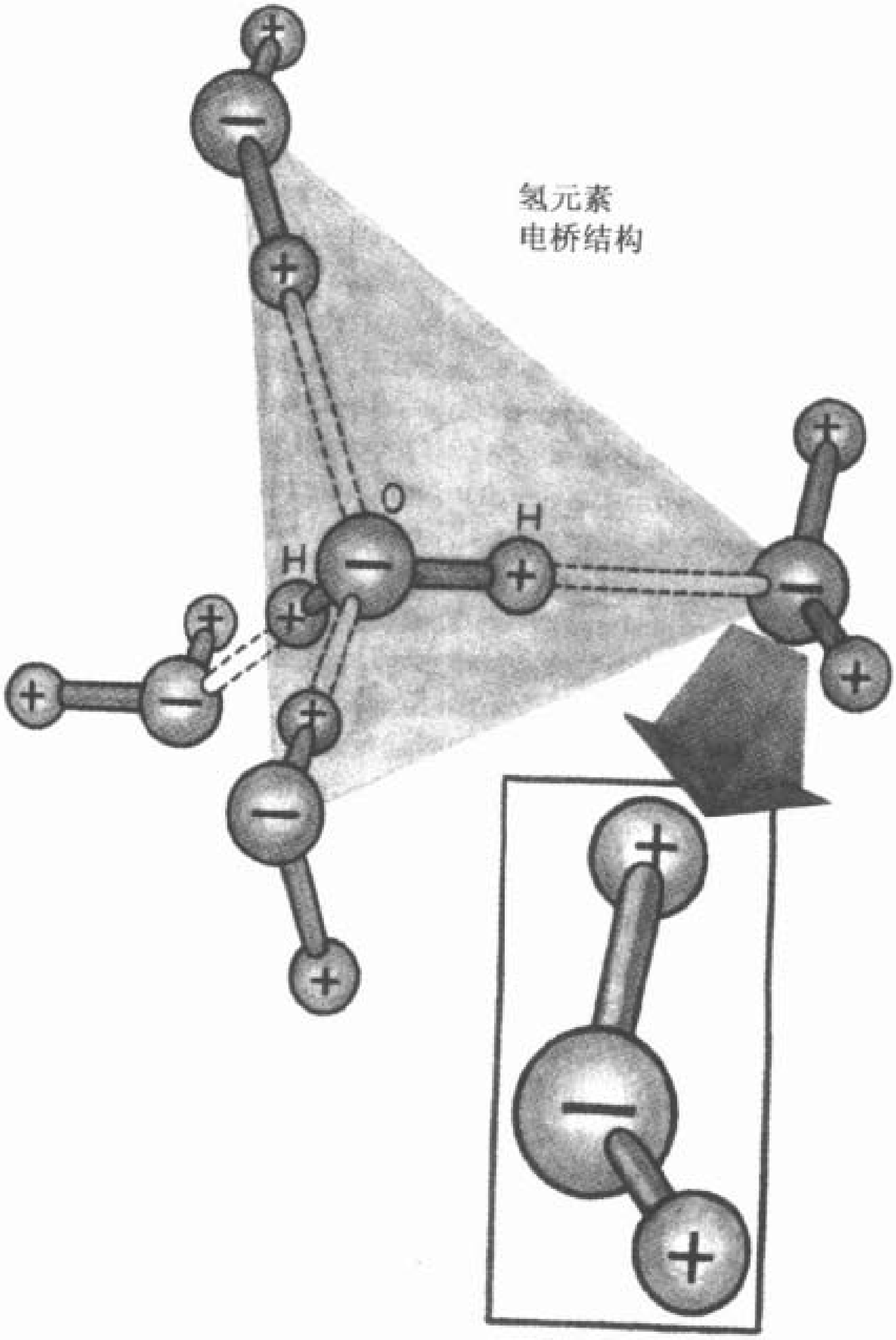


								2 He 氦 4.0026
			5 B 硼 10.811	6 C 碳 12.0107	7 N 氮 14.0067	8 O 氧 15.9994	9 F 氟 18.9984	10 Ne 氖 20.1797
			13 Al 铝 26.9815	14 Si 硅 28.086	15 P 磷 30.9738	16 S 硫 32.066	17 Cl 氯 35.453	18 Ar 氩 39.948
28 Ni 镍 58.69	29 Cu 铜 63.55	30 Zn 锌 65.39	31 Ga 镓 69.72	32 Ge 锗 72.61	33 As 砷 74.9216	34 Se 硒 78.96	35 Br 溴 79.904	36 Kr 氪 83.80
46 Pd 钯 106.40	47 Ag 银 107.87	48 Cd 镉 112.41	49 In 铟 114.82	50 Sn 锡 118.71	51 Sb 锑 121.760	52 Te 碲 127.60	53 I 碘 126.9045	54 Xe 氙 131.29
78 Pt 铂 195.78	79 Au 金 196.967	80 Hg 汞 200.59	81 Tl 铊 204.38	82 Pb 铅 207.2	83 Bi 铋 208.98	84 Po 钋 210	85 At 砹 210	86 Rn 氡 222
110 271	111 272	112 277						

最后几个元素尚未定名

65 Tb 铽 158.925	66 Dy 镝 162.50	67 Ho 钬 164.93	68 Er 铒 167.26	69 Tm 铥 168.934	70 Yb 镱 173.04	71 Lu 镥 174.97

97 Bk 锫 249	98 Cf 锎 252	99 Es 锿 253	100 Fm 镄 254	101 Md 钔 256	102 No 锘 254	103 Lr 铹 257



一个H_2O分子

钠则相反，它很想甩掉其惟一 1 个来自第三个壳层的最外面的电子，因为靠得很里面的第二个壳层被用 8 个电子给占满了。它通过与最外面的壳层里正好还缺 1 个电子的氯合并来达到 8 个电子配置这样一种方式，成功地做到了这一点。食盐氯化钠就这样形成了。惰性气体有所不同，它们只是迫不得已才与其他元素反应，因为它们最外面的电子壳层分别被固有的 8 个电子占满了。

这样，被扩展了的玻尔原子模型的数字游戏，能对化学反应的过程作解释，这是一个比它或多或少是偶然被发现的更加令人震惊的事实。1949 年，爱因斯坦怀着十分惊讶的心情在他的《自传录》里对这一成果描述道："这一摇摇晃晃的且又自相矛盾的基础，就可以让一个具有玻尔那种独一无二的才能和细腻情感的人，从而发现光谱线和原子电壳的主要定律及其化学意义，这过去对我来说像是一个奇迹——今天对于我来说仍然还是一个奇迹。这是思想领域至尊的乐感。"

一项引发众多争论的实验

物理学的任务是解释世界，寻找出可见物与不可见物发挥运动时遵循的定律，而且这些定律还可以用来预报宏观粒子和力在未来的状态。除此之外，其规律的有效性不受时空的限制，无论是在地球上还是在另一个星球上，无论是白天还是夜晚，无论是宏观的还是微观的。换言之：物理学定律都应是普遍有效的。

在经历了过去几个世纪漫长岁月里形成的许多不同的哲学和方法论方面的尝试之后，人们在20世纪达成了观察和观察性的实验在物理学当中起着非同小可的作用这样一个共识。理论依属于它们。如果某一次实验或对大自然的观察得出的结果用理论解释不了，那就必须对这一理论提出质疑——任何一种理论的有效性永远都只是暂时的：其时限只是到相反的情况在实验中得到证实为止。

这就是为什么——那些通常只在安静的小屋里冥思苦想的理论工作者也想出一些实验课题的原因。这些课题中有些实验后来也确实得到了实施，有些则仍然是幻想。证明后一种情况的著名的举证是在实验室观察者以光的速度移动或身处远离地球之外的宇宙空间的实验。另一个极为有名的虚构的实验就是本书开头已描述过的薛定谔的猫——一个不仅是因动物保护的缘故没有实施的实验，而且之所以没实施也是因为简直没这样的必要。对这种实验方法作一下分析就足够了，因为实验结果是明摆着的。

然而，有那么一个重复了上千次，既用来解释、同样也用来驳斥量子物理学的实验——它就是双缝干涉实验。有什么没被物理学家塞进这条缝隙：各式各样波长的光，铅弹，电子，质子，圆球，X光射线。他们改造、优化、推动了探测仪，移动和推动双缝，在它们之间放入测量仪器，尽管如此，这一实验的结果一直反复令人瞠目结舌，对它们所作的分析使研究人员很长一段时期摸不着头脑。

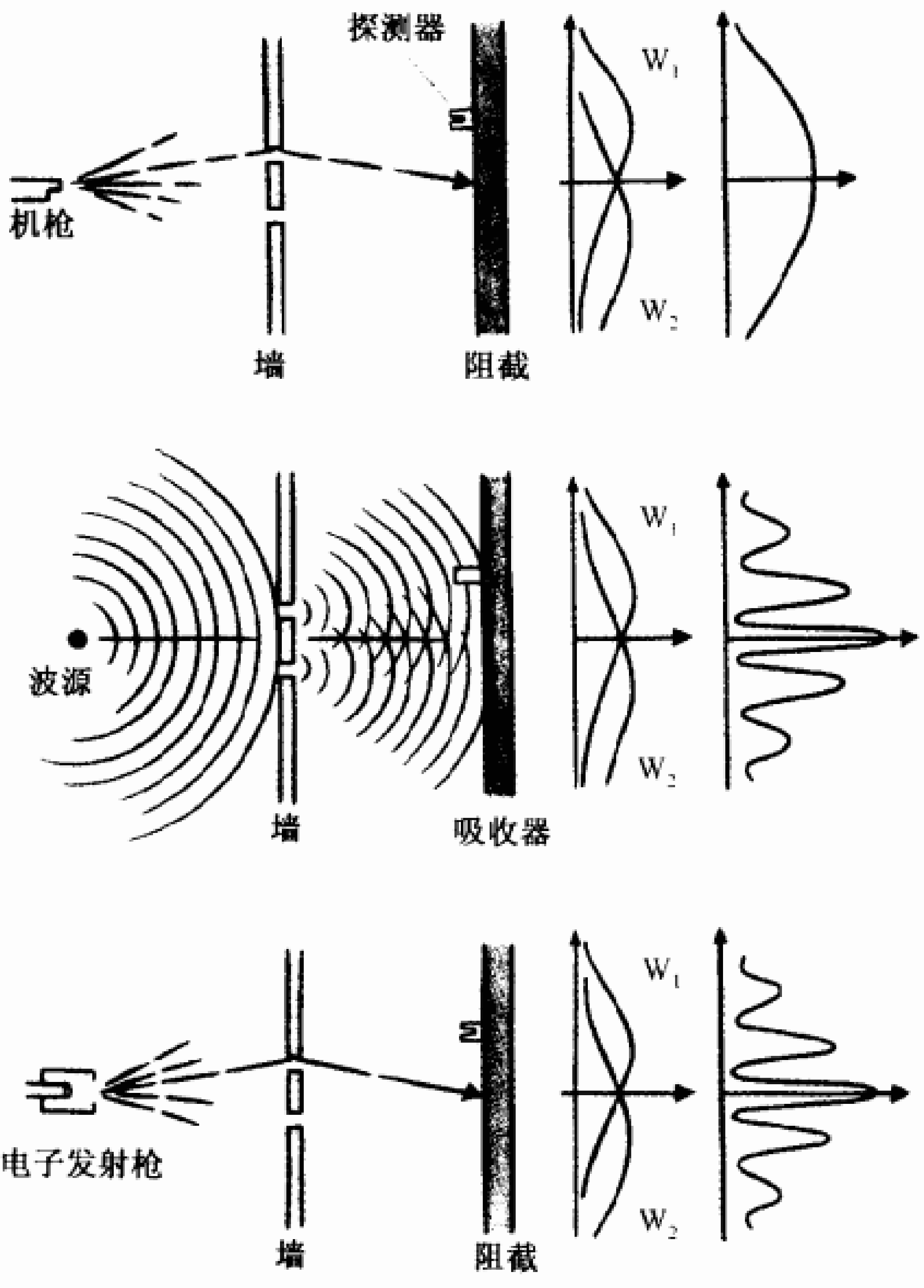
实验对不同对象在飞经双缝时的情况进行比较。基本材料是一道有两只圆孔（或细缝）的墙，在该墙后面隔一段距离有装着探测仪的第二道墙。墙壁分别是用什么材料做成的方式不一，这要根据观察的对象是什么而定。但是探测仪始终有能力记录命中物及其击点。源头在双孔墙的正前方，它射出人们想要观察的物质。

第一次虚构的实验设定对象为枪子弹，是比较大的子弹。在双孔墙前面放着一挺机枪，它朝实验物发射子弹。这些子弹中有些穿过第一个孔，有些则穿过第二个孔。这就造成落在后墙上的子弹分散在整个墙面上。

人们是想凭借这种装置，从实验角度找到解答这样一个问题的答："一个穿越墙孔之一的子弹到达阻截墙中心点周围一定距离的概率有多大？"事实直接表明，人们只能讲概率，因为一颗颗子弹的确切的命中点是不能预测的。此外还有一个先决条件，那就是子弹自始至终完整地到达，不因反弹而受损。

对许多子弹测试的结果，得出图中所示的曲线。事实很清楚，命中点距离阻截墙中心越远，子弹落得非常靠外面的概率就越低。然而，这种概率的峰值恰巧就在阻截墙的中心，这一事实长期以来不那么清楚。但是，只需将这一实验重复两遍，其中一次蒙住第一个孔，另一次蒙住第二个孔，就可以理解这一事实。当第一个孔被蒙住时，所有的子弹只能从第二个孔飞越过去，这时就能得到图中标有 W2 字样的曲线。若蒙住第二个孔，就会出现 W1 的分布状况。

一项引起众多争论的实验



如果将这两种概率的分布状况相加，就可以得到原先的实验中同时将两个孔敞开而测得的曲线。除此之外，引人注目的是阻截墙上的每一个值相当于一颗机枪子弹的若干个倍数，这里不存在中间值，因为点数时只点整颗子弹。

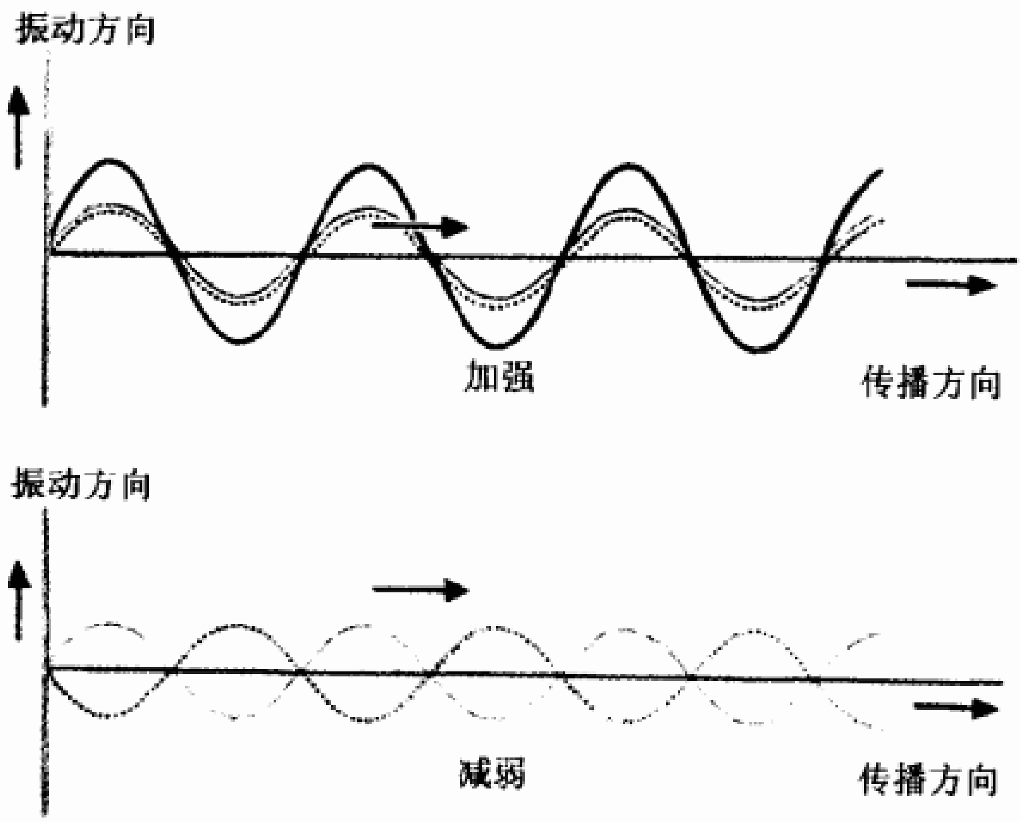
这里所描述的实验在第二轮当中不重复使用机枪子弹，而用水波。人们将这两堵墙放到水里，在双孔墙前方不再放一挺机枪，而放置一个所谓同轴励磁机，例如一支笔，该笔按规律上下移动，插入水里时产生环状波纹，波纹以同样的形式向四面八方扩散。阻截墙（一般不反射波）上的探测仪器在这种情况下记录着显现出的水波的强度。

类似前面的做法，人们现在提出了这一种做法对阻截点的依赖的程度有多高这样一个问题。首先，人们认为监测到的波动强度的随意性很大。这就与第一个实验有着一个重要的区别，在第一个实验中子弹只能完整地出现或根本不出现，可以说是一份一份或一团一团地出现的。

作为阻截墙上的强度曲线出现了图中所示的有异样色彩的曲线图。它是怎么形成的呢？为了解开这个疑团，现在再先把一号孔蒙住，只让波从二号孔通过，然后调换堵孔再进行。显然，这两个孔中的周围分别都出现环状波纹，波纹朝阻截墙方向扩散。如果每次都蒙住一个孔，从一号孔和二号孔出来的两种波纹中的每一种都在那儿绘制出一幅强度分布图，它正好与使用机枪子弹

时出现的相似。

然而，令人感到惊讶的是，这两种水波的叠加产生一个与机枪子弹分布图完全不同的样式。这里的区别就在于，一次涉及的是简单的子弹群密度，而另一次涉及的则是波动。密度与密度就相加了。而波与波之间则相互减弱或加强，这种现象被称之为干涉。阻截墙上水波的总强度是因来自孔 1 和孔 2 的两个独立波的干涉而形成的。



干涉的原则：加强和减弱

至此，这一举世闻名的试验让人们看到了粒子和波动之间根本的区别隐藏在何处：粒子只能以一份子一份子的形式被记录，波动会干涉，即相互加强和减弱。

这一实验尚未结束。现在要进行第三次实验，然而，

这一次对象是电子。例如人们可以把一根烧得温度很高的发射电子的金属丝当作源头，这根金属丝发射的电子借助电场朝双孔墙方向加速。

在这种情况下预计会有什么样的结果呢？电子是微粒，因此有许多东西可以证明它们和机枪子弹完全一样是一份一份地到达的，因为半个电子是不可思议的。这一点可以通过在阻截墙上安装诸如小型盖革计数器那样的测试仪来检测，一旦某个电子到达，这种测试仪总会发出一种响声。（事实上，在这次实验中人们可以听到电子到达的声音那就是一连串响声。）电子确实是单独地，一份一份地到达的，那它们显然是微粒。如果再分别关闭一个孔，只让电子通过另一只孔飞过去，得到的又是 W1 和 W2 的曲线。

如果现在把电子在阻截墙上一些特定的点上撞击的频率记录下来，那得到的——这也的确令人惊奇——绝不是像用机枪子弹那样的分布图，而是水波中形成的曲线。微粒怎么会产生这样一种干涉呢？

诺贝尔奖获得者，本世纪最著名的理论物理学家之一的费因曼（Richard Feynman），在他的一些讲座里也谈到过这个问题。他以他特有的风趣方式描绘道："万物都是那么的神秘。你越是盯着它看，他就愈加显得神秘。许多理论是经过千锤百炼而得出的，其目的都是试图利用一个个通过复杂的途径穿越洞孔的电子来解释这种曲线。它们当中未曾有哪一种获得成功……从中我们得出以下结论：电子如同微粒那样是一份一份到达的，而这一

份份电子到达概率分布得像波的强度一样。从这个意义上说，电子有时像微粒，有时像波是可以理解的。”

波函数和概率

爱因斯坦是第一个使光的微粒本性与波动本性协调一致的人。然而，在20世纪第一个10年里，人们与一种自成体系的理论还相差甚远。爱因斯坦自己已注意到这一缺憾，并在1909年说道：“正因如此，我认为理论物理发展的下一阶段将给我们带来一种光的理论，这一理论可以理解为光的波动理论和辐射传播理论的一种统一。”新一代年轻科学家在20年代创立的量子理论恰恰在这方面做出了成绩。

关于这个年代，著名物理学家赛格雷（Mililio Segrè）在他的回忆录里这样写道：“这是本世纪最伟大的挑战，若有人想应战，非得开辟一种新的思维方向不可。在这里，我们面对着一种罕见的现象。在只有几年的时间里，这一秘密被从三面攻破。初看上去，它似乎不是一种，而是三种截然不同的，且又各自坚实的量子力学形式。过了一段时期之后，人们才认识到，它是同一种理论的三种不同的数学表达形式，其实，它们是同值的。”

这里所涉及到的问题，其实是用数学的方式正确地描述光不仅能以微粒，而且能以波动的形式出现。在这里把通往这一目标的各种途径和迷途列举出来，这也许就要大泼笔墨了。给后人保留下来的是这三种数学方式

的合并物，它们分别是由理论家德布罗意（Louis de Broglie）、海森堡（Werner Heisenberg）和狄拉克（Paul Dirac）于20年代（指20世纪——编者注，下同）创立并完成的。格里宾（John Gribbin）利用象棋形象地对此作出了解释："上面标明各棋子位置的棋面是可以复制的；但是，如果想以这种方式纪录整盘棋的话，就需要很多的位置。各个棋子的棋步也可以这样来描述：开局是皇后兵。若用最简洁的代数式纪录，这步棋就成了 d2 — d4。三种不同的描述方式对一个结果，即兵从一种状态过渡到另一种状态，提供了同样的信息。若使用这些不同的量子力学的描述方式，情况也同样如此。狄拉克的量子代数式是最典雅的、从数学意义上说又是最完美的表述形式；玻恩（Max Born）及其同事在海森堡之后提出的这些模型方式比较复杂，尽管如此，它们是有效的。"

当时被称之为新型科学的量子力学，描述的是原子量级范围内的物理现象。在那里，无论是光还是粒子的物理现象，都不像我们从采用宏观标准的自己的经验中所期盼的那样。要探寻量子力学的基本特征，必须准备接受这里展现的是另一种世界。在这个世界里，无论是逻辑也好，经典物理学的惟一性也好，一概无效。但是，事实会表明，量子力学自身同经典物理学完全一样合乎逻辑，量级较大时便过渡到经典物理学。

光看上去有时像波动，有时像粒子流，这在前面已作过阐述。观察这一现象，使年轻的物理学家德布罗意萌生了这样一个念头，这样一种物理现象岂不对电子同样

有效吗？电子具有像波一样的行为，这难道就不可能吗？实际情况是：玻尔原子模型表明，电子只允许在特定轨道上绕核子而行，其轨道角动量是 ħ 的若干个整数倍。若在数学上稍稍改变这一形式，这里面同样会要求电子的运转轨道必须是电子"波长"的若干个整数倍。这样以往一直被视为微粒的电子也可以看作是波。

一些实验结果支持这一论点：早在 20 年代初，美国就有人观察到晶体上的电子可以分散，并像光波那样叠加。乔治·汤姆逊（George Thomson）——研究员 J·J·汤姆逊的儿子，参加的一些其他的试验为电子的波动本性增添了依据。这样一来，1906 年因证实电子是粒子而获得诺贝尔奖的 J·J·汤姆逊，成了他儿子乔治·汤姆逊 1927 年因证实电子是波而获得诺贝尔奖的见证人。父子俩各有各的成就，双双受到表彰当之无愧。

1925 年，物质波的想法还只不过是一种朦胧的设想。只是到了奥地利物理学家薛定谔开始提出一种不仅能够描述电子的波动物理现象，而且能够描述电子的微粒物理现象的数学波函数的时候，那些与此相连的想法才变得更加具体化。他称这一波函数为 Ψ，此时，他不仅为光子和电子，而且还为物理学世界所有的粒子创造这种类型的表达形式。起初，他在这方面还是以电子和其他粒子是波这种较为形象的设想为出发点。当他第二年应玻尔之邀去哥本哈根，并在那里与这位老前辈一起继续对自己的理论进行加工时，他不得不违背自己的心愿承认，这里所涉及的不是空间内真正的波，而是想像中

的数学空间内一种复杂的振动形式。每个独立的粒子将由三维相空间内的波动方程式来描述。那么两个粒子就需要六维,三个粒子九维等等。另外还有将量子跃迁同时纳入这一理论这样一个问题。不久,薛定谔对这些数学表述形式的复杂性感到后悔,据说他曾经说过:"如果就停留在这个该死的量子跃迁上的话,那我后悔自己曾经苦心钻研过量子理论。"

尽管如此,他最后还是成功地创造了一种原子模型,其依据不再是电子在一个个壳层上绕核子旋转,而是原子核处在驻波的场中心。这种电子云将按不同的能量级接受不同的几何形状。

爱丁顿勋爵(Arthur Eddington)在他那本于 1929 年出版的《物理学宇宙观》一书中这样表达了这一见解:

"有点类似的语句,在别处看到过:这些缘滑的桅帆在波浪中翻滚和晃动。"

他以这种幻想中的语句出色地点中了薛定谔认识的核心:人们对于电子究竟在原子里的哪个位置不甚了解,因为它"缘滑"而又"晃动",它是琢磨不定,玄之又玄的。薛定谔设想的电子云,也可以称之为"驻波"。例如,有些乐器会产生驻波,如拨动吉他琴弦的中间部位,琴弦就开始振荡,而且振荡得让波腹在中间。若看着这根弦,的确能看到驻波,因为我们的眼睛不可能看清如此快速的颤动。若在中间按下琴弦,就会强行在那里获得一个波节,并制造一个高一级的谐波,即一个高八度的音符,其波长正好是二分之一。激发基波振荡之后,甚至还会有其他

的一些谐波，可是它们会变得越来越模糊和微弱。人们完全可以类似这种样子在原子中设想驻电子波。

薛定谔认为这些电子云包围着原子核，而且这一形象至今仍然有用。当然，这些电子云的形状比琴弦颤动时的更为复杂，因为原子是三维的。基波振荡的造型是一个围绕中心的圆球，下一个谐波呈波瓣状，且各有两个对称的波瓣，下一个具有四个波瓣，再下一个谐波的样子就复杂得多了。

从薛定谔公式的含义转变当中看出，从玻尔那种还是比较传统思维到年轻一代先进观点的这一过渡。玻尔学到了，光完全同电子或其他粒子一样，甚至整个原子，也既可以作为波也可以作为粒子出现。根据不同实验的具体情况，实验对象分别表现为不同的形状。他把这称为“互补定律”。从未有过两种形状同时在一个实验里出现的情况。

玻恩在 20 年代使哥廷根大学成了量子力学中心，他为薛定谔的公式找到了一种新的解释：在空间任何一个点上的波动强度——数学上通过波函数的平方来表达——是在这一点碰到粒子的概率的大小。据此，物质波有点类似流感。假如流感波及一座城市，这就意味着：这座城市里的人患流行性感冒的概率增大了。波动描述的是患病的统计图样，而非流感病原体自身。物质波以同样的方式描述的仅仅是概率的统计图样，而非粒子自身数量。

比如说电子在特定的瞬间正好在哪里，这是绝对说

不准的，但是波函数可以计算出在实验中的某个特定的位置上碰到它的概率。从理论上讲，电子可以同时在各个地方出现。然而，有一些地方它停留的概率很高，有一些地方则几乎是不可能碰到它的。

如此一来，量子力学让世界变成了一个不可准确预言的世界。粒子现在是否处在一个特定的点，电子是处于原子中一个较高的还是较低的能态，它在一个分子里是属于这个还是那个原子，所有这一切都因这一新理论而变成了一种没有多大把握的冒险游戏。上帝的色子是：只有统计数对自然进程给予咨询，因果已经被扬弃。

世界能够以其宏观的尺度继续存在，并且也在那里继续遵循经典物理学的规律，其原因仅仅在于，粒子的数量特别巨大时可以使那些不确定因素大大减小，就好像那些均匀地分布在空间里的某种气体的分子，其速度的方向分布是均匀的。

量子力学的这一解说起初遇到很大的阻力，这并不奇怪。连大多数原先参与制定这一理论的物理学家，也拒不接受这一激进的设想，它们当中有像薛定谔、普朗克、爱因斯坦和德布罗意这样一些大名鼎鼎的人物。到玻恩的波函数理论学说被普遍接受，又经历了数十个春秋；1954 年，他才终于为此获得诺贝尔奖。

海森堡测不准关系

在物理学里，只要在特定的瞬间说明各个对象的位

置和速度，世界就能得到翔实的描述。按照牛顿的惯性定律，万物的运动，以及这种运动方式的进展也就因此而被确定了。这就是我们知道的“因果定律”。

20 年代，积极参与制定量子理论的年轻物理学家海森堡，此时作了下面的虚构的实验：假如说，我想十分精确地测量某个电子的位置和速度，决定为此使用一台辨析力很高的显微镜。用别的话来说，这意味着我用光束来照亮该电子，为的是我能看见它。其实，为达到此目的单独一个光子自然就够了。由于电子特别的小，用来观察它的光的波长必须还要小得多，这是光学中的一个固定的定律。我使用一个波长特别短的光子，以此“照亮”电子，为的是能够精确地测量其位置。波长极短的光子具有很高的频率，因此同时（按照普朗克 $E = h \cdot \nu$ 的公式）具有高能。

如果测量时高能的光子遇上电子，它就会因高能而向电子发出巨大的反冲。电子可谓被推走了，它确切的位置不可能再确定了。光子的能越高，反冲越强。这种测量意味着对这一系统的干扰，有碍于进行准确的测量。

海森堡从它的理论思索中引申出这样一种公式，即无论是测不准，还是——如他所称的——“位置和速度的不确定性”（动量，即速度乘以质量）在每一次测量时，它们都相互对易。它们之间相乘就会得出一个比 h 大的积。这是一个极其微小的数字，因为 h 仅为 6.6×10^{-34} 焦耳·秒。从宏观上来看，这种不确定性根本不妨大碍，但对原子的尺度来说，它是巨大的。

很可能海森堡对这一认识的深刻影响是很清楚的，但他没说别的，只是把它说成是抛弃因果关系的原因而已。1927 年，他这样写道："从原则上讲，上述提及的被自然确定的精确限度的重要后果是，因果定律在某种程度上变得空穴无物。"在原子的尺度里适用的不再是因果关系，而是偶然性和概率。他继续写道："因果关系清楚地表明：如果我们了解现时，就能计算出未来，这里面错的不是后面那句话，而是那个先决条件。"

另外，1927 年在《物理杂志》上发表的《海森堡测不准关系》不仅适用于粒子所处的位置及其动量的值，也适用于能量和时间的值以及其他一些配对的测量值。

尽管海森堡只是从理论上推导出他的定律，但它一开始便自然引起了包括实验物理学家在内的一些人的不安。事实上，测不准关系说明的是，人们不能同时精确地测量粒子的位置、动量或能量。其原因不在于使用的测量仪器不完备，而在于事物的本性。实验者们起初当然不愿意相信这一点，总是在设计比海森堡更加精密的实验方法。但没有人能够无视这一点，大约在它问世 10 年之后，海森堡测不准关系成了现代物理学普遍承认的组成部分。

如果一位研究人员有了新的发现，后人很少能够在各个细节上跟随他的思维过程。由于海森堡与玻尔共同在所谓的"哥本哈根学说"中详尽地阐述了他的想法，另外还以比较通俗易懂的方式对它作了描述，使我们今天能够找到理解测不准关系科学结果的途径。已经解释过

的双缝实验，为海森堡的观点提供了形象的说明。

试验的方式与以前描述过的一样。此次实验过程中不使用机枪子弹、电子或水波，而使用光。人们让光束穿过那道有两只圆孔的墙，并记录下有多少光到达这道墙后面的阻截墙上。最好的方法是，用一卷固定在这道墙上的胶片来反映这一情形。胶片的阴影部分将表示到达光的强度，因为每个到达的光子会在感光材料的内部引起一种化学反应，这种反应产生一个（黑色的）银原子。胶片上的某一点越黑，到达那里的光子就越多。海森堡写道："摄影胶片的阴影部分是量子进程中的一种化学过程，它是由一个个光子引起的。因此，这种实验也必须能够在光子设想中得到描述。"

而在胶片上显示的是深浅不一的条纹，最深的条纹在中间，越是往外条纹色越浅。这对专业人员来说很清楚：这是一幅典型的干涉图。在利用穿透双缝的水波所进行的实验中，出现过同样的情形，只不过它是作为一条条曲线被探测仪记录下来的。胶片上那些黑色条纹完全可以轻而易举地转换成这样一条曲线：若把阴影的程度作为曲线的高度记录到图表里，就正好形成那幅因水波而熟悉的图像。

穿过双缝的光子，尽管它们物理现象像粒子一样，但描绘出了证明其波动本性的干涉图。对于这种罕见的现象，海森堡是这么想的："一个独立的光子要么穿过第一个孔，要么穿过第二个孔。如穿过第一个孔，并在那里被分解，那么它以后在感光片的某一点上被吸收的概率，与

第二个孔是关着，还是开着无关。胶片上的概率分布图必须是同样的，就好像只有第一个孔是开着那样。”第二个孔的情形相类似。两张分布图又得出两条我们已经在讲机枪子弹、电子和水波时看到过的独立的曲线。胶片上阴影的总和必须是这两条曲线的叠加，不能有干涉条纹。但是实验一清二楚地显示了这些干涉条纹。海森堡从中得出了这样一个结论：“从这里面我们看出，光子必然是从这个或那个孔穿过的说法有问题，而且导致了一些矛盾……这意味着，‘发生’这一概念就必须限定在观察上。观察自身是断断续续地（跳跃式地，作者注）改变概率函数的。它从一切可能的过程中挑选出确实演示过的那一过程。由于我们对该体系的认识因观察断断续续地发生了变化，所以其数学表述方式也断断续续地发生了变化。因此，我们提到‘量子跃迁’……从可能到事实的过渡是在观察行为发生期间进行的。如果我们想描述原子过程中发生了些什么，我们必须以‘发生’一词只涉及观察，而不涉及两种观察之间的状态为出发点。”

这一说法也能应用到薛定谔的猫身上。在不打开箱子的情况下，谁也不知道猫的状态。若要描述这种状态，就要对该动物在某一特定时间点是死还是活作概率说明。真正的认识只有通过测量，即通过打开箱子才能获得。和测量一个个粒子的能的时候完全一样，人们以这种方式改变了“客观”现实。哲学家从此开始思考的问题是，如果物质要到被观察时才成为现实，那是否还谈得上一个现实的世界。猫要到箱子被打开时，才知是死的还

是活着的。只有当人们进行测量时，电子才处于某一特定的能态。电子从原子中的一个壳层跃至另一个壳层，似乎无人知道是怎么回事，原因是人们不可能观察到这一过程。

有些时候，物理学家作过为自己的目的而利用这种两难选择的尝试：他们将那些绝对不能解释的虚构的实验的结果视为非现实的，而世界只有通过测量才成为现实的。然而，在最近这段时间里，这些猜测被证实为谎言：几次真正的测量证实了这些虚构的实验。为此以后这样的事会更多。

如果看一下20世纪初物理学家那种还算是鲜明的、毫不含糊的、定型的世界观，将它同量子力学被“发明”之后的情形作比较，就能估计出科学家思想当中的这种革新带来的转变有多深刻。几个世纪以来，人们曾经习惯于按因果关系进行思维，测量的精度总可以达到测量仪器可以做到的那样。粒子是粒子，波是波。

到了这时，所有的一切面目全非，交融组合。粒子也是波，或者相反，测量必然是不准确的，关于微观世界里哪个地方发生了什么，再也没有不变的确定性。粒子什么时候处在什么位置？它这时有哪些特性？凭借量子力学只能粗略地回答这些问题。统计概率取代了确定性。没有人再能计算出或者测量出粒子处在哪个位置。尚能计算出来的只有，它在某个特定的时间点处在某个特定的位置的概率。在这方面，人们始终看到物理学的任务在于解释自然，尽可能详细地描述其状态和定律。

物理学至少在直观意义上与这一任务相距甚远，相反它在数学意义上正好履行了这一使命：量子理论对所有微观及宏观世界的各种现象作了计算规定，它对从电子在磁场中的运动一直到宇宙空间里星球的产生这一切作了解释。

就连原子也被量子力学重新解释。它这时不再是圆球了，也不再是由核和电子构成的行星体系，而已经变换成为一个看上去不再是随手可及的东西。分子式仅仅只表明，在原子一些特定的位置上会有什么样的概率，在那里有一个电子、一个质子或中子（或一个更为复杂的粒子）处于一种极为特定的能量状态。

如果记住所有这一切，就可以理解，量子力学的理论甚至不得不排除诸如爱因斯坦、普朗克或薛定谔这些伟大的天才头脑里的巨大障碍，更不用说这种模式在那些迄今为止对此一无所知的平民百姓当中的贯彻力量。

在“哥本哈根学说”中，玻尔和海森堡对于这些新的认识是否会推翻我们整个世界观这样一个问题作了总结性的答复：经典物理学的依据是假设，或者应当说，是幻想，我们可以在不谈论自己的情况下描述世界。——譬如说，我们知道，伦敦这座城市的存在是不依赖于我们是否看到它或看不到它。我们可以说，经典物理学展示的正是世界的理想境界……其成果导致客观描述世界的普遍的理想。长期以来客观性作为衡量科学成果价值的最高标准。量子物理学的“哥本哈根学说”与这种理想还适应吗？……量子理论肯定不包含其实是客观的特征，它

提倡的不是物理学家的作为原子过程一份子的精神或觉悟。但它开始将世界分为物体和其余的世界，并开始我们无论如何必须用经典的概念来描述这个其余的世界这一事实。

尽管存在各种认识问题和哲学方面的讨论，但量子力学并非是无收益的、仅有助于从知识上满足一些物理学家头脑的游戏，它解释了许多在这之前一直令人困惑不解的物理现象。但这仅仅是某种理论的一个方面。只有到了它也能够对一些实用性的物体和实验进行预言，到了快要派上各种各样的最好是影响或改变人们的日常生活的用处时，它才变得永久实用。——就如同可以制造和计算一些最为复杂的机器的机械结构和驱动原理的牛顿万有引力理论。麦克斯韦的电动力学理论也是这样，根据这一理论电和电磁波成功地应用到电话、收音机和电视上。

这听上去是多么的惊人，尽管量子力学有些神秘的特点，但它的情况也是如此。没有量子力学，今天也许就没有半导体，因而也没有计算机工艺，没有激光器，没有CT、没有超导和原子钟。这种在外行面前显得如此高不可攀，而且大多数根本不可能再理会的科学，很可能已经影响了我们每个人的生活。它的历史肯定还没有终结。

隧道效应——本不该发生的事

对于粒子停留的位置，人们向来只能说明其概率分

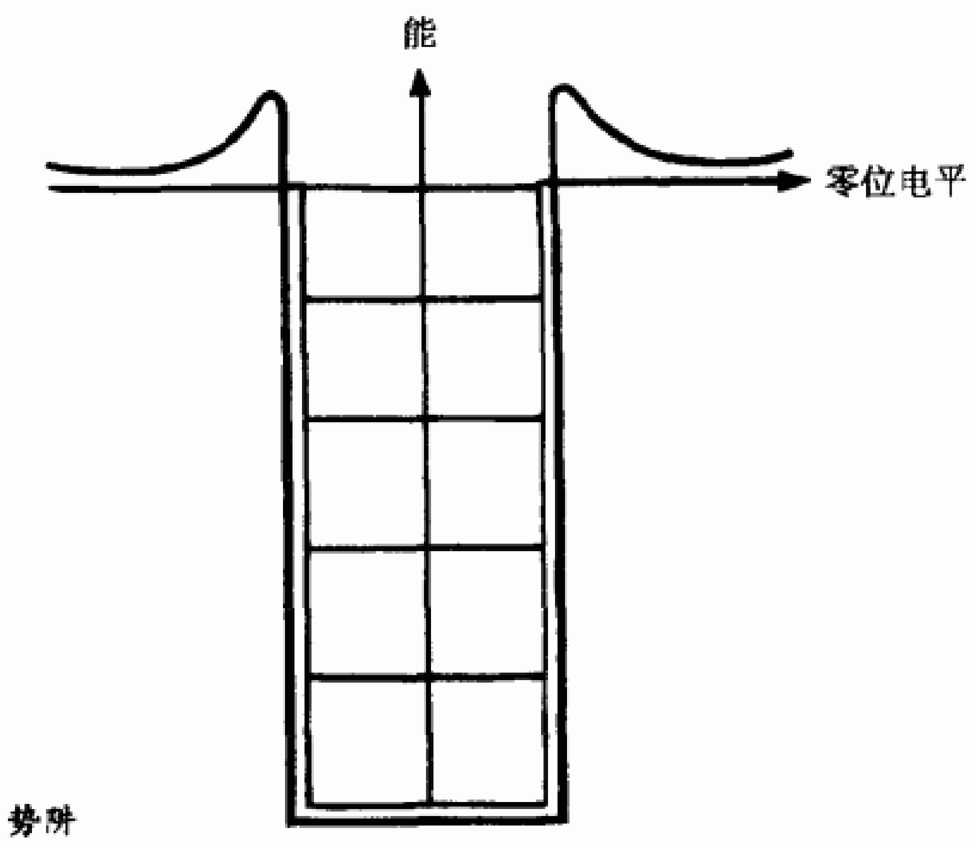
布情况，这一量子力学的原理也有一些具体的结果可以在实验中得到检验。更多的是：某些物理现象也只能用粒子绝不可能准确地定位来解释。

这一时期发展起来的关于原子的电子壳层理论，是多么的精辟，迄今为止关于原子核结构的设想，又是多么的含糊。人们所知道的一切就是，原子核是由带正电的质子和中性的中子构成的，它主要是被核力聚合在一起的。有些理论的出发点是，像是在原子壳层内部一样，核里面也存在类似的壳层，它们试图以此来解释核中间有一些状况极其稳定的元素这一事实。这些元素遇到诸如2，8，20，28，50，82 和 126 这些所谓“神秘”数字时便出现。如同以前对于电子壳层那样，人们试图利用类似的数字游戏，来说明这些神秘数字形成的来龙去脉。然而，这些理论至今不完全令人满意。

在众多用于原子核的模型设想当中，有一种是所谓的“势阱”构图。如果将在那里出现的动力相互叠加，并用图表来显示，就会出现这样的势阱。就其效应而言，这种势阱确实与一只锅子相符，因为如果用一只真的锅子来装圆球，那么圆球在那儿的表现就会类似质子和中子在它们那个虚构的势阱里的表现。

核的中心占主导地位的是威力非常强大的核能。距离中心位置越远，这些引力就越弱，为此，那些在带同极电荷的质子之间的排斥的电能，现在越来越引人注目。象征着势阱边缘的核的“边缘”，恰恰是质子在那儿不再被核力束缚，而被电的排斥力往外排斥的区域。

一件不该发生的事情：隧道效应



在正常的情况下，质子和中子在核里面从不越出这一边界。由于每个原子自始至终试图保持最稳定的、因而也是最低的能量状态，所以它们尽可能位于势阱的底层。它们缺乏跳出边缘的能，这就完全像那些圆球不可能跳出真的锅子的边缘那样。它们最多只能从外界，如通过撞击或升温，才能获得为此所需要的能量。

现在，宏观和微观世界之间的区别又一次显露出来：一方面我们日常生活中的圆球绝不可能自行逃出锅子，另一方面在原子核势阱里的质子恪守着量子力学的法

则。这些情形说明，粒子不是百分之百肯定，而只是以某种概率，即使可能的话，也只是以很高的概率位于势阱的底部。这里仍然留有不肯定因素。

因此有可能发生一些核子有时——虽然罕见，但毕竟还是存在——离开的现象。我们从大自然当中认识到了这一点：这里讲的是核辐射。比如 α 射线分别由两个质子和中子构成，但也有中子辐射，遇到这种辐射，中子会被从核子里面推出来。没有这种量子力学，或许就无法解释这种现象是怎么形成的。

这又再次证明了海森堡的测不准关系。如果举例说，同时完全准确地确定某种状态的能和时间点是不可能的话，那就有可能出现这种情况，即一个粒子在一个很短暂的时期里有一个比它本该有的要高得多的能。在这一瞬间，该粒子可以离开势阱。这些规则要说明的仅仅是，能量的不确定因素乘以时间的不确定因素必须小于 h。人们称这种粒子离开势阱的现象为“隧道效应”，因为第一眼看上去好像是粒子通过势阱内壁的隧道逃遁的。隧道效应不仅与具有核辐射的 α 辐射和中子辐射有关，而且还与其他一系列现象有关。所以比如说在 20 年代，恒星内部那些轻的原子核相互间为什么能聚变就仍是个谜。在那里测得的各种温度不够高，因此不能解释，带正电的原子核是如何抵抗相互间的电排斥力的。据观察，它们没有足够的能量翻越势垒，从而进入下一个原子核。只有隧道效应，才能解释粒子穿透这堵墙的百分率很低这一现象。如物质中原子的数量特别高的话，这些相对

地说少量的粒子已经足够能解释在太阳和恒星内部大量获得的能量的情况。

隧道效应无时不在，无处不有，只是因为其体积甚微而一般不会被人察觉。然而，两位研究员宾尼希（Gerd Binnig）和罗雷尔（Heinrich Rohrer），在80年代发明了一种正是以这种效应为根据的奇妙的仪器。这种所谓的扫描式隧道显微镜，能够扫描小到原子尺度的一些结构，他俩因发明这种仪器于1986年获得诺贝尔奖。

这种显微镜的核心部件是一根探头，它是由一根极细的钨针构成的，最理想的探头的顶端是仅由一个独立的原子构成的。例如它被引到贴近铜表层的上方，铜表层的原子是人们要扫描的。当然，针头本身也是由具有电子壳层的原子构成的。由于钨是一种金属，一部分电子几乎可以在探针内自由地来回移动，但不能离开探针，因为按照量子规则，这对它们来说是禁止的。对铜而言同样如此。如果现在针尖直接在铜表层的上方，没有触及到它（间隔距离大约为千分之一毫米），也许人们会认为，钨电子始终在探针里，铜表层电子始终在铜里。然而，事实上电子可以在针和铜之间来回跳跃，它穿越禁止通行的中间空隙。这种情况发生的频率，当然取决于针尖和铜表层之间的间隔距离。它们之间靠得越是紧，就越是容易发生换位。如果另外还在针和铜之间附加电压，就会有更多的电子钻过虚构的隧道：此时有一股很微弱的电流，即所谓的隧道电流。

假如现在用这根探头系统地对表层进行扫描，记录

每一个点上隧道电流的强度，就会获得一幅表层示意图，这幅图精密得甚至还能显示出一个个铜原子。目前这种技术有了进一步的发展，一些公文包式的仪器已占领了市场。

英国人约瑟夫森(Brian Josephson)有了另一种以隧道效应为根据的发现。1973年，他作为历届受表彰的最年轻的物理学家之一，获得了诺贝尔奖。他是因所谓的约瑟夫森效应而受到表彰的。这种效应涉及到的，是在极低的温度下也有一股微弱的电流穿越非常薄的绝缘层这一现象。与约瑟夫森同时的有在美国的江崎林奈(Leo Esaki)和加埃沃(Ivar Giaever)——成功地解释了一些超导媒质中的这种效应。约瑟夫森效应在电子薄层元素中得到应用，极大地提高了电压探测仪的测量精度，并能够更好地确定精细结构的常数，即原子的基本常数。

两个粒子之间神秘的遥感

因果关系已经过时，只有统计概率还发挥着效应。量子力学的这种说法让科学世界陷入一种混乱局面，时至今日这种混乱尚未消失。属于最杰出人物的两人，爱因斯坦和玻尔，将毕生的精力投入到关于这一问题的科学争论之中，不确定是不是世界的基本原则，或是否还有所谓隐藏着的、只不过尚未发掘的、描述量子力学现象真正起因的变量。爱因斯坦相信后者，玻尔却认为概率说是基础。这一争论在两人生前未得出结果，最近这几年

里才有越来越多的迹象表明道理在玻尔一边。

如果像爱因斯坦和玻尔这两位天才人物就某一主题展开争论，那只能是在最高水平之上进行的，因此翻阅这两人之间展开的唇枪舌战是扣人心弦的。尤其是爱因斯坦经常不断地想出一些旨在证明例如海森堡的测不准关系并非总是有效的实验。玻尔后来总是将爱因斯坦的理由驳得体无完肤。这一争论持续了数十年，而在这里将这场争论的所有细节都和盘托出，那就没完没了了。在众多虚构的实验当中，有一个实验经历过这些年代，至今仍然具有现实意义。这里指的是爱因斯坦于 1935 年与其同事勃多尔斯基（Boris Podolsky）和罗森（Nathan Rosen）共同设想出来的一种虚构的实验。该实验后来被以这三位发明人姓氏的第一个字母命名为“EPR 实验”。

这三位理论家曾要求人们，设想共同制造两个物理上相互耦合的光子。例如这样的光子配对可能会在粒子，诸如电子，与它的反粒子，即正子，相撞并由此湮灭成能时产生。这两个正在形成的光子以光速散开，相互之间没有关系。按照相对论来说，这也是根本不可能的，因为两种物质之间的信息传输最多是以光的速度进行的。

假设定为，人们现在正好在测量第一个（因此自然也是第二个）光子的产生时间，那按照海森堡的定律就不能确定其在这一时间点上的能量。由于能够极为精确地测量另一个粒子的能量（为此不测量它的发射时间点），所以从中同样可以精确地查明第一个光子的能量，因为两

个能量的总和是因通过粒子与反粒子配对而得知的。因此不仅可以精确地确定能量，而且可以精确地确定发射时间，从而回避测不准关系。怎样才能解决这一矛盾呢？

一种解释是，有那么一种像爱因斯坦所说的“幽灵般的遥感”，通过它这两个粒子之间可以相互沟通。这样的话，相对论就有问题了，按相对论来说，各种信息不可能以超过光的速度传输。另一种解释是，两个光子以某种不为人知的方式相互联系，即它们在特性方面仍有联系，因此测量其中的一个也就可以推算另一个，或正好相反。爱因斯坦、勃多尔斯基和罗森赞同第二种观点，并相信还有尚未知晓的、隐匿着的变量，这些变量在粒子之间产生相互作用。

EPR 之谜使得物理学家心神不定。1964 年，美国研究员贝尔(John S. Bell)终于成功地通过数学途径表明，所有关于这种隐匿着的变量的假设，作出了与量子理论不一致的预言。这一步很重要，因为它为现在不再仅靠虚构的实验，而且也可以为依靠真的实验室实验来查证量子力学的基础、提供先决条件。

在这种情况下，法国物理学家阿斯佩(Alain Aspect)于 1982 年制定的实验方法可称为世纪实验，该实验运用了光波偏振现象。

偏振是光的一种特性，即光在空间里一种特定的方向下振动可以通过某物的特性。我们知道偏振片，这种薄片只让部分光线(或光粒子)穿过，其作用犹如一扇百叶窗。物理学家格里宾为这一类型的偏振光现象找

到了一种有说服力的比喻，这就像他写的那样："光子像是携着长矛。所有将长矛横在胸前的光子，可以在木棒之间溜过去；所有高举长矛的光子被封锁，穿不过狭窄的缝隙。普通的光里面会出现各种各样的偏光——这些光子的矛表明不同的偏振角。"

粒子的偏振犹如自己的自旋，是一种量子力学的"是非"特性。粒子不是向一个方向偏振，就是向另一个方向偏振，决不会同时向两个方向偏振。要是将光线对准一块偏振片，偏振片的作用就会像上面所提到的百叶窗那样：其自旋与主轴（专业人员称其为偏振轴）平行的光子穿得过，其他的则过不去。到了第一块偏振片后面的光子，全都在一个特定的，与第一块偏振片的主轴平行的方向偏振。

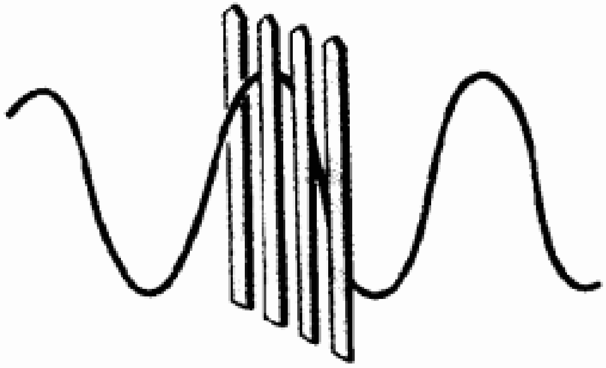
假设该方向是横向的。若在第一块偏振片后面再摆放一块其主轴是纵向放置的偏振片，那所有的光子都被封堵，因为它们的偏振方向是横向的。用两面彼此之间垂直放置的偏振片就可以百分之百地阻拦每一道光线。

现在，这种实验有了进一步的扩大，并获得了一个惊人的，惟有凭借量子力学才能够理解的结果。假定我们在这两块偏振片之间再放一块偏振片，其主轴与第一块偏振片的主轴形成一个 45 度角。到了那里的光子有一个偏离主轴的偏振角 45 度的偏振角，这就是说，按照经典的设想，没有哪一个光子可以穿透过去。然而实验却表明，事实上有百分之五十的光子过得去。这一点只能用量子力学的概率来解释。因为它给每一个粒子百分之

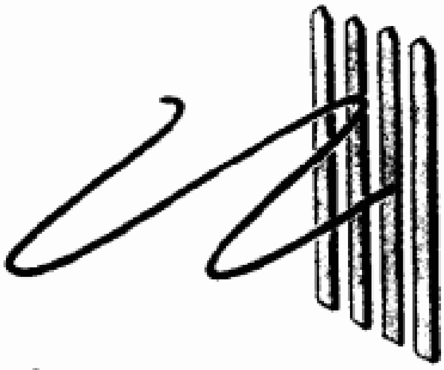
五十穿透偏振片的机会。还有另一个奇特的现象：已经穿过来的光子的偏振方向，与放置的第二块偏振片的主轴平行，也转了 45 度角。这些光子——还是原先送出的一半——现在到了后面的偏振片旁，它垂直于第一块偏振片，以 45 度角对着第二块偏振片。就像在第二块滤光镜那里遇到的一样，这里也有一半光子穿过去。总之这里得出了一个自相矛盾的结果：如果在光的前面放置两块相互垂直的偏振片，就不会有哪个光子穿透过去，而如果在它们之间再放置一块转过向的偏振片，最后所有光子中就有四分之一会透过。在这种实验过程中也像在双缝中那样，很少能够预言单一的光子的行为是如何的。我们只知道它穿得过或穿不过实验器材的概率。两块偏振片之间究竟发生了什么，对此根本无法预言的。

此时，阿斯佩已经把这种现象当作他那著名的实验的内容。简单地说，他同时制造了两个各奔东西的光粒子。然后，他将它们分别穿过一块偏振片，在每一边测定穿过来的粒子有多少。根据光子不同的偏振方向，光子能够以一定的概率穿越这块偏振片。阿斯佩这时的观点是，这两个被同时制造出的光子的反应始终如一：这当中有一个穿过一块偏振片，那另一个也会穿过偏振片，或相反。

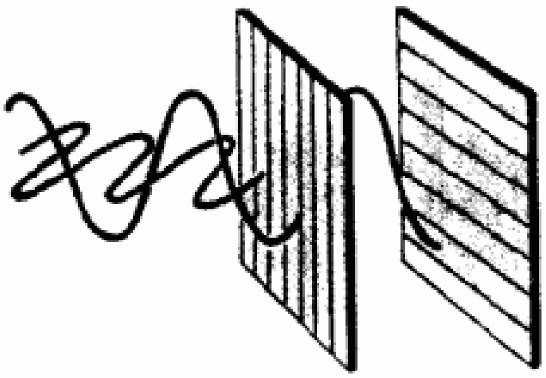
这种情形还不至于过分令人吃惊，因为我们可以这么想，这两个光子是因共同制造而相互关联的，它们的一举一动有内在联系。它们的情况也许只会像以下例子中的这两个色子那样活动：现在有两个方块，一个红的，一



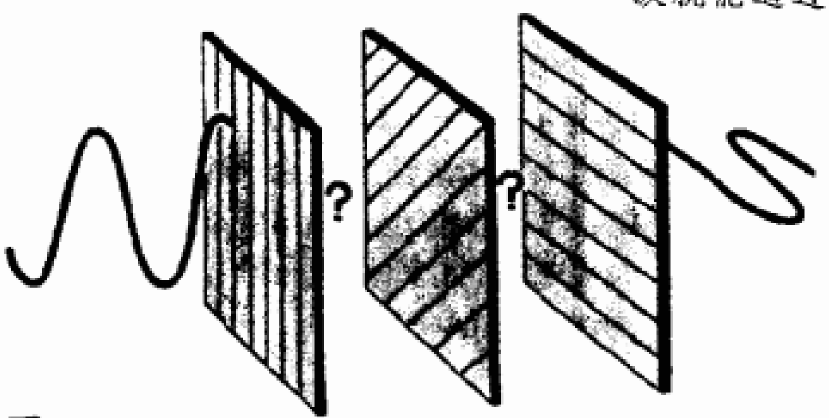
图一



图二



图三



图四

偏振片只让其偏振方向与主轴方向平行的光波穿行。这里光波都是从左边来的。

图一：两者都为纵向，波可以通过。

图二：波的偏振方向为横向，主轴为纵向：波不能通过。

图三：波有几个偏振方向时，其偏振方向与主轴平行的一部分波被偏振片穿出来。左边的偏振片只让纵向的振动穿透，右边横向的偏振片什么也不让通过。

图四：一种奇特的量子力学的效应：在图三所示的两块偏振片之间放置一块与它们转了45度的偏振片，一部分波就能通过，但最后转了向。

个黑的。一个被放进一个盒子，另一个被放进另一个盒子。接着两个都被寄出。收件人不知道，哪一个小包裹里放着哪一个方块。一旦他打开第一个盒子，立刻就会知道第二个盒子里方块的颜色，因为如果这里面装着的方块是红色的，那另一个方块必然是黑色的，或恰恰相反。严格地讲，这也是两个方块之间超光速的联系，它为进一步思考一些理论提供了动因。

就是因为这一点，阿斯佩实验的结果，迄今仍未广泛地令人惊异。但他不甘罢休，而是扩大了实验的配置。他在两个偏振片前面，装上了改变穿透光子偏振方向的"开关"。这些开关受一只随机发生器控制，这就是说，开关的开或关完全是偶然的。此外，开关工作的速度之快已到了，即使光子已经在途中，也能够换向。这两个光子，当它们在起飞时，还不知道，它们是否能够穿过偏振片。

当然，这种实验实际上还要复杂得多，这里只能描述它的一些基本情况，其结果如下：尽管如此，这些当时"属性相同"的光子一直像双胞胎那样行动一致。只要其中一个可以穿透偏振片，另一个也能这样，其中一个被弹回，那另一个也不例外。尽管途中的条件有所变化，而这依然如此。其中的一个光子是从哪儿得知，另一个光子那里的开关是开着的或是关着的呢？由于信息传递的某种方式，这是不可能发生的事，因为光子是以光速移动分散的。

这种情形过去是，现在仍然充满着神秘色彩。阿斯

佩和一大批仿效其实验的人的成功之处，在于利用贝尔的预言，作出了控制光子这种奇特的双胞胎现象不可能是隐匿的变量这一判断。不管怎样，人们因此而得知玻尔在与爱因斯坦进行的那场争论中有道理。

依然含糊不清楚，而且事实上会让为此而做的每一次实验更加迷惑不解的问题是，这两个光子是何以相互调准其行为的。第一个光子何以知道第二个光子的行为？一个光子是何以知道另一个光子刚刚飞越过开关并改变了偏振方向？还有它是如何获得这样一个信息：它的同伴是否还有能力穿过偏振片，以便使自己显示同样的行为？

有些研究人员又重新回到海森堡曾经提出过的说法：对于自己不能观察的东西，就不能做什么说明。正如很少有人能知道一个电子在一个原子中如何描述一个特定的轨道或如何穿越双缝试验中的这一个或那一个洞孔那样，我们可以设想在贯穿阿斯佩实验始终的这两个光子之间会发生什么。

另有一些研究人员闯劲更足：他们认为，在这种奇特的现象的背后隐藏着一种神秘的关系。伦敦的物理学教授伯姆(David Bohm)认为，那种被我们视为分开的粒子的东西，根本不是分离的，而属于“层次更深的现实领域”，它含有一种我们不熟悉的、含蓄的秩序。与其相反，贝尔能够以不等式证明量子力学的有效性，他认为这只不过是爱因斯坦的隐匿变量的复兴而已，所以拒绝接受这些旨在让万物相互联系的理论。

尽管如此，如果我们想一下，在一直追溯到宇宙大爆炸的时期里，所有的原子曾几何时与其他的原子或粒子有过相互作用，一种特定的关系因此得以保留，那么宇宙万物彼此之间可能都有联系这种想法，就不再完全是错误的了。无论如何，这会提出一种与我们一般人头脑所拥有的世界观截然不同的世界观。也许物理学以此已到了开启新纪元的边缘？不管怎样，当量子力学产生时，那些突然被人们当作现实而接受的东西同样是值得注意的。费因曼又一次在他的讲座里这样说道："自相矛盾只是现实与感觉之间的冲突，这也许就是现实。"

爱因斯坦的相对论是否遭到阿斯佩的实验的驳斥，这个问题还一直存在着。乔(Raymond Y. Chiao)、奎亚特(Paul G. Kwiat)和施泰因贝格(Aephraim M. Steinberg)，这几位在贝克莱用类似的实验来论证阿斯佩结果的研究员，也在考虑这个问题。1993年，他们在《科学博览》中写道：照这么说爱因斯坦的相对论受到威胁了吗？令人惊奇的是没有，因为不可能利用粒子之间的关联作用，来达到以超光速传递消息的目的。其中的原因在于，光子是否到达探测仪器之上纯粹由偶然性的决定……只有通过直接将两次对显然是巧合的计数结果进行测试的情况作对比，我们才能证实那些超空间的关联作用。因果关系原理也就没有受到破坏。以超光速传递信息对于科幻迷来说无疑是会令人感到兴奋的，但这在物理学上似乎仍然是不可能的！

宇宙学和多元世界

在薛定谔虚构的实验里，那只猫生与死同时并存。物理学家把这种情形称为两种状态的叠加。这种几率在数学上是通过状态的波函数来解释的。如果我们还是采用物理学家的表述方式，那我们就通过打开箱子即测量使波函数确定。遇到这种确定条件，某种几率就会变为现实，表现在薛定谔的猫这一事件里，它就是生或死。

这种解释在提到过的哥本哈根学说中已经成文，其中提到，每一次测量即每一次观察都会使得参与的波函数确定。再认真仔细地思考一下，这种解释也引出了一系列的难题。比如说，如果把这只装着猫的箱子打开，然后并不朝里张望，那会出现一种什么情形？那么波函数会不会照样确定？或者我朝里看一看，然后把结果告诉我身旁的人，那么波函数对他来说又会重新确定吗？其实，这都是些普通老百姓肯定不会去研究的稀奇古怪的问题，但这些问题却使得物理学家和哲学家不得安宁。

按照哥本哈根学说，我们的日常生活，乃至世界的运作在于一种持续不断的波函数确定。此外，这是对世界作出的一种难以自圆其说的解释，即便这对自然科学工作者来说也许并非如此。但它未能让一批理论工作者心服口服，所以他们试图创立另一种量子力学的说法。这种说法后来以多元世界理论的名字而著称。该理论的先驱者是埃弗雷特(Hugh Everett)，他 50 年代在普林斯顿

大学惠勒那里获得博士学位。两人觉得奇怪，如果观察波函数，它们会以魔术般的方式确定。由于整个宇宙是由无数相互叠加的波函数构成的，他们认为，最终也就必须有人观察这个宇宙，以便让它的波函数确定并最终以此将它转变为现实。

为了消除这一两难困境，埃弗雷特假定，宇宙间相互叠加的波函数在确定之前，留有很多选择余地，它们相互之间是平行的，从未确定。观察者并不是让几率减少了，而只是从众多现实的可能性中挑选一种。就好像有许多波函数叠加一样，同样存在许多相互平行的世界。估计出的数字为 10^{100}，这是一个远远超出各种可以想像的数字。然而对于观察者来说，存在的分别只是一个可能的世界，即他刚才凭观察选定的那个世界，与此同时，他无法与其他平行的世界取得联系。

运用到薛定谔的猫这一情景上面，这就意味着：这里不只是一只猫，而是两只猫。一只是活的，一只是死的。哥本哈根学派说，观察员通过打开箱子使这两种可能性中的一种成了事实。与此相反，埃弗雷特认为两种可能性仍旧是现实的，只有观察员在两者中选择一种。箱子里的放射性原子不是蜕变了或没有蜕变，而是存在一个原子蜕变了的世界和一个原子未蜕变的世界。两者——若相信多元世界理论的话——同样都是现实的。在真正的世界里显然不是只有这么两种抉择，而是难以计数的。

EPR 虚构的实验及其真实的接替者也能用多元世界论来解释。按埃弗雷特的观点，实际情况并不是，我们

决定要对光子的哪一个偏振方向进行测试，在宇宙的某个地方以魔术般的方式，强迫光子的偏振接受一种相应的状态，倒是我们仅仅是在选择自己要在众多现存的现实中看那一种。

这种观察世界的方式，如同埃弗雷特所证实的那样，完全可以从数学上与量子力学取得一致。它对于我们来说之所以不可理解，只是因为它不符合我们的思维习惯。但量子物理学家过去经常得跨越这种障碍。格里宾个人认为多元世界理论是完全可信的，他用一句话概括了哥本哈根学说与这种理论之间的根本区别："要么没有什么是现实的，要么一切都是现实的。"

他把这一理论与过去是确定的，未来是不确定的说法联系在一起。过去"我们从许多现实中挑选出了一个真实的历史，在我们这个世界上有人一旦看见一棵树，它就留在那儿，即便无人再朝它看一眼。这一点一直追溯到宇宙大爆炸也有效……通往未来的路有很多很多，它们中的任何一条都将在我们眼前开辟一片崭新的视野。回首一段清楚的往事，我们可以说出自己走在哪条路上，然而未来将仍然是无法辨认的，因为未来的种类是那么的繁多"。由此，我们应当公正地看待惠勒(John Wheeler)的行为。他是这种多元世界理论的创始人之一，但他后来又宣称与此无关。他于 1979 年这样解释到："因为我担心，这种多元论到处随身拖着一件过于沉重的，形而上学的包袱。"

不管是相信它也好，不相信它也好，多元世界的这种

情形宇宙学里也有。林德(Andrei Linde),一位俄罗斯物理学家,发明了一种连贯地审视多元世界的方法,并用它来解释世界是怎样产生的。他得到的结果是,宇宙是一个没有穷尽的整体,它不断地在复杂的过程中以一些先产生,后又不知不觉地崩溃的小宇宙的形式复制自己。我们这个宇宙便是这些小宇宙之一。然而,新的空间世界源源不断地在诞生,它们之间的差异如此之大,所以它们甚至具有一个完全不同于我们这个世界的维数。

与所有的理论家一样,林德认为,对于大爆炸后很短的一段时间来说,谈论地点或时间似乎是毫无意义的,当时两者都还不存在。他建议宁可把当时的条件想像得跟由时空构成的晃动不定的泡沫一样。关键问题是,泡沫起初排列无序,分布情况紊乱。在科学界凡是遇到这样一种状态,人们称之为混沌,即偶然的随时随地会出现的振荡。

在一些特定的条件下,从这样一种混沌当中会形成一种一部分振荡像是“被冻结”的局面。从这一部分里面孕育出一个完整的新的宇宙。另一部分继续不断地发展,制造新的混沌,这些混沌又可以产生新的宇宙。因此,整个宇宙空间可能就是由无数小宇宙构成的。这些小世界分别在膨胀或者萎缩。它们的特别之处是,只有它们各自的居住者可以观察和觉察到它们。按照林德的观点,宇宙如同那只死或活只是对观察者而言的猫一样,必须观察,这样它才能显示其存在。

林德还借助量子物理学,对银河系的形成作了解释。

这一理论通常只适用于微观物体，但它在宇宙空间同样起着决定性的作用。量子场论渐渐地告诉人们，空间历来决非十足的虚空，而永远充满着一切可能的物理场的微小振荡。若这些振荡有时偶尔超出一定的值，它们会被冻结，然后转换为真正的可测量的场。这样的一些场破坏平衡，并最终像一粒粒细小的种子那样，导致质量的形成，银河系归根结底就是由这样的质量集聚而成的。由于这些振荡的分布完全是种巧合，如果从很远的距离观察我们这个宇宙的话，不仅可以解释其均匀性，而且质量分布的不均匀性也能得到详细的解释。

对于我们自己这个宇宙来说，迄今为止一直运用大爆炸理论，它将继续得到保留。林德的混沌的膨胀理论——这是它正式场合的称法——只是说明，这不是惟一的一次大爆炸，它既不是第一次，也不是最后一次，而整个宇宙将永无止境地在许许多多的大爆炸中继续不断地繁衍自己。

量子物理世界最新的实验

原子在 20 世纪上叶还只是些理论模型，比如说在这些模型上可以确定量子力学的定律。时至今日，原子已经成为可视的具体的对象，这些对象曾被实验员封存、拍摄和尽可能精确地测量。测量仪器和电子技术最新的发展使这一切成为可能。在这一方面尤为引人注目的是，比不上拳头那么大，因而可以放在任何哪个实验室的仪

器——离子势阱里。尽管离子势阱的原理公开已有40多年，但这些精密的微型仪器随着近期工艺的开发才达到了它的鼎盛期。其中，高真空技术的日臻完善和一些新的程控技术起了作用，另外还有利用超导轨迹制造强大的和均匀的磁场以及利用变频发射激光的技术。

离子势阱里，离子即一个已失去一个或好几个最外层电子的裸原子，被电磁场封锁得不能脱身。只要离子稍微离开势阱中央一丁点，它将立刻被在那里增强的场重新吸回来。

这种第一眼看上去犹如基础研究人员的玩具一样的东西——事实也是如此——现在早就证明了它的实用性。没有任何其他的仪器能像离子势阱那样，如此精确地作物理方面的测量。其原因在于海森堡的测不准关系。众所周知，这一关系表明，一个由测量时间和能所得的乘积不可能超出一个特定的值，即普朗克有效量子数。假如现在可以借助势阱大大延长测量时间的话，那么藉此对能进行测量的不准确性就会降低。离子在离子势阱里的停留时间可能是很长的——目前的最高纪录是10个月。这就可以让能量的测量达到极高的精确度。

就这种形式的测量可举的一个例子是，还要进一步改善在原子钟里进行时间测量的精确度。为此，人们使用镱-离子两个电子壳层之间的过渡结。由于原子核磁场对壳层内电子的自旋具有影响，电子的能级分得非常细，人们把这种现象称之为精细结构。

对于这种实验，人们利用一种双共振：其频率可以微

调的激光射线，通过给原子提高一个能级的方式，使“挖空”分解线的某个特定的能级。若原子再离开此级，它们会以荧光的形式显示能的级差。与此同时射入了那些自身的能量正好与两个相邻的精细结构之间的差异相符的微波。通过这种方法，挖空了的级又可以重新填满。一旦达到谐振频率，就可以从荧光急剧增强这一点上看出这一情况。这种测量如此精确，从而打破了微波分光镜中的所有纪录，这就是说，人们能够以此将激光的频率调谐得精确到几乎可以用它来测量时间。像这样一种钟走时的精度为 3 000 万年只误差那么 1 秒。

离子势阱的另一种用途，就是可以相当精确地确定质量。到目前为止，校准质量时仍然一直使用存放在巴黎郊区塞夫国际度量衡管理局里的标准千克。这种标准千克是一个用白金-铱制成的柱体——其实是与当今的超精测量方式时代极不相称的事物，因为高科技的标准早就运用于当今测量系统的另外两个基础单位——米和秒。

最终也该为千克设定一个精辟的、世界的每一个角落均可理解的定义，这是一个对同样包括量子力学家在内的人的创造力进行挑战的目标。极为精确地确定一个原子的质量，然后再鉴定 1 千克里含有多少原子的想法，很有可能成为实现。如果是这样的话，我们就能用最常用的原子质量单位——碳同位素原子 $^{12}_{6}C$ 质量的 1/12（约等于 1.66×10^{-27} 千克）来表示。

硅原子被囚禁在一个离子势阱里，并在那里沿着磁

场的方向旋转。这种被称之为“回旋加速振荡”旋转的频率，取决于磁场的强度和离子的质量。利用一些实验方法可以将这种频率的精确度测到十亿分之一。如果现在还能继续制造一块等级最高的硅单晶体，并能用光栅隧道显微镜对其进行测量的话，那凭借这种方式就可以清点晶体中单位体积所含的原子数。假如这种做法能获得成功的话，塞夫的标准千克便成了多余之物。

不久前，美国和奥地利的科研人员证实，量子物理学的对象不一定都是极其微小的事物。在好几所高校里，人们成功地将势阱中的原子几乎冷却到绝对零度，而这些原子并没有因此而聚合成液体或固体。它们后来构成一个所谓的“玻色-爱因斯坦冷凝物”，一种世界上未曾出现过的物质。这里所涉及到的是自旋数为整数的粒子，即玻色子，按照量子力学的定律，可以停留在同一种状态中的玻色子的数量是不限定的。在这里所描述的一些试验里，有高达1 000万个原子进入了尽可能低的能态，并因此而完全看不出有什么区别。它们的表现犹如一个单个的巨型原子。尽管如此这些聚合体凭肉眼还能看得出。

从这种试验里面，人们想进一步获得对这种物质的状态的了解，当然还想获得实际应用：类似上面所述的，它们可以用来更精确地测量时间和长度计量单位。一些科研人员也已经谈到要制造所谓的原子激光器——这里所指的仪器不像激光器那样发射光子，而是发射方向完全相同、非常紧密地聚束在一起的原子。也许它们的作用就是类似一种规格最小的喷雾枪，将那些薄薄的非常

精密的结构输入电子半导体芯片。

玻色-爱因斯坦冷凝物的特点之一，就是物质在这里几乎处于绝对零度这一事实。直到几年之前，要达到仅高于绝对零度百万分之一度（相当于－273.15℃或0K）的温度，需要几周的冷却时间，而且耗资巨大。然而90年代，物理学家发掘了一种量子力学的诀窍，从此以后，他们利用这一窍门成功地在数分钟内将原子冷却到这一温度。

其实热无非就是运动。一种气体的原子杂乱无章地在空间中运动，势必经常碰撞。它们的飞行速度越快，这一气体就越热。甚至在一个固体材料里，原子还在围绕着它的静止点振荡。一旦原子完全静止下来，绝对零度便达到了。按照量子力学的定律，这种情况从不可能完全发生，因为海森堡的测不准关系里自始至终规定着一个极少的能量额度，如果粒子的位置被清楚地固定之后，它必须拥有这一额度。人们称这一额度为零度能。

为了将势阱中事先已经冷却了的原子（它们在那里被激光的辐射压强收拢）冷却到几乎接近绝对零度，人们利用原子吸收只以一定大小的量子形式出现的能这一事实。这一大小必须正好与电子的两个能级之间的能差相符。现在人们用激光照射原子，激光的光子略低于这个能，也就是低于这个频率。由于这个势阱里的原子还一直在微动，那些激光飞向的原子，因多普勒效应，光子相对于原子的频率就会发生改变。那么，该频率就正好相当于必要的吸收频率。原子在吞噬光子。由于其能事实

上不足以将电子提升到一个较高的轨迹，缺少的能就从原子的运动能中获取。结果是原子被制动。如果它以后又释放被捕获的光子，那它就又回到基态，但振动的速度要比以前的缓慢。这种被称之为“激光冷却”的方法，现在已成了量子物理学家的标准方法。

不仅时间、距离和质量的测量，而且物理学的基础研究也需要越来越精密的仪器。激光，即振荡频率非常稳定的光，属于最受人喜爱的“探子”，用它们可以检查原子、离子或一个个粒子。然而，激光的精度现在对有些试验已不够了。因此，物理学家目前正在开发一种全新的光：所谓“非传统”的光，其粒子像是排列在珍珠链绳上一样。若使用这一种粒子形象来描述光束，那这一光束就是由一排光量子，即所谓的光子构成的。光束的强度取决于单位时间的光子数量，颜色则取决于它们的能。

遗憾的是，无论哪一道“普通的”光束都包含着很大的不稳定性，光束的强度越弱，不稳定性的干扰就越大：光子——若是激光束也是这样——不是按有规律的间隙一个接一个地到达，而是按统计数分布的。如果光束是由无数粒子构成的，这就不会引人注目，因为强度差异后来得到了平衡。但是如果光强度过分的低，换句话来说，如果光束仅仅是由少量的光子构成的，它们就会像雨点滴答滴答地落在伞上一样，进入测量仪器。这种现象或许可以同霰弹枪射击相比。即使在那里，一颗颗子弹也不是按能够精确预言的顺序到达靶子的，而只不过可以通过统计来描述。所以从这种现象当中得出的振荡强

度，在光这里被完全相似地称为“霰弹噪声”。

特别是当人们想借助光束进行非常精确的测量工作时，这种噪声就会非常不受欢迎。为了避免最后在两道光束叠加时，由霰弹噪声引起的振荡强度被误认为是测量结果，激光束必须达到一定的强度。然而，更多的是技术和费用方面的原因以及光学器件的热膨胀使光束不能如愿以偿。

在坐落在慕尼黑郊区戛尔兴的马克斯-普朗克量子光学所和康斯坦茨大学里，人们因此在考虑，怎样才能将本身就没有规律的传统光，变得“不传统”，即十分均匀。

在通常的情况下，光量子的产生，是因为一个原子从高能级跃迁至低能级。与此同时，两种状态之间的能量差会随意地，而且以光子的形式释放出来。现在，这样的过渡就刻上了会偶然发生这样一个讨厌的印记。它们的时间点是不能精确地预言的——正是由于这个原因，光子在普通光那里“滴”得如此不均匀。

一个在离子势阱里的单个粒子，可以在一定条件下被动地有规律地从激光那里吸收光子，不一会儿又释放它们。激光的强度越高，间隙就越短。凡是这种可以想像得如同珍珠链条般的光，都被称作为“非传统光”。

测量这样一种用光子做成的“珍珠链条”，同时又不能破坏它们，这似乎比制造这种光更为艰难。因为实际上一切测量过程都是以一个个光量子被吞噬，并因此从

珍珠链条上拽下来为依据的。这样，它们的规律性就不复存在了。

所谓的“单原子激光器”指明了一条摆脱这种悖论的出路。它不仅可以制造，而且可以测量非传统光。使用这种精密的仪器时，当比如说用激光束高度激活铷原子之后，便以一定的速度将它们移推入一个谐振器。谐振器的长度非常准确地调到原子特性位置上，这必然会促使原子过一定的时间之后以光子形式释放它的能量。如果谐振器调谐得非常精确，温度冷却得很低的话，那么原子过了同一时间之后又会吸收光子，接着又将它释放，周而复始地进行。

当几个原子穿过谐振器之后，会有一部分光子留在那里，人们可以对这些光子作一番调查，方法是清点跑出来的原子，测量它们的能态。通过这种方式可以在不破坏辐射场的情况下，获得有关谐振器内部非传统辐射场的信息。

“单原子激光器”为研究非传统光，展现了一个非常有趣的模型体系，当然它只含有少量的光子，因此很难适合于许多实际用途。所以，康斯坦茨大学目前正在尝试通过完全不同的方式，制造强度还要高得多的“珍珠链条光”。为此，人们正在使用存在于某些光学上非线性的晶体之中的倍增频率。

所有这些，尽管今天看来也许依然具有传奇色彩的理论和实验，不仅仅是为艺术而艺术。这一点，可以从各种各样的，关于怎样才能借助这种珍珠链条光，对光通讯

进行革命的思考当中看出来。因为这样，也许可以花较少的财力，将完美输导引到信息业当中去。以至如今在全球范围内，大型计算机公司也在研究非传统光，这就不足为奇了。

量子物理如何改变着我们的日常生活

激　光

尽管爱因斯坦早在1914年就根据其理论思维预言肯定存在类似激光的东西，然而研究人员到了1960年才成功地将这一想法贯彻到一种仪器上。这也许就是最重要的直接以量子物理为依据的发明。

这里是用词的程序：镭射(Laser)—— 这个概念如今在德语里已入乡随俗，几乎已没人再会想到这里所涉及到的其实是一名称的缩写。"Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation"是它的全称，德语的意思是：利用受激辐射使光扩大(增强)。

从实用的立场来看，激光器是一种发射高密度光束的光源。这种光束具有一定的波长，它那形式相同的波是平行和同步移动的。物理学家称这两种特性为"单色"和"相干"。与"普通的"光不一样，它是由许多不同的波长的单色光构成的，其波振动不是平行地，也不是有节奏地振荡的。

目前，激光器的种类繁多。其波长涉及从红外线到紫外线的范围，其强度在零点几毫瓦和军用的庞大的兆

瓦之间变化。现在有那么一些所谓受脉冲的，会一束一束地释放能的激光器；其他的激光器，如连续线性激光器，发射一种持续不断的光束。

无论什么激光，辐射都是以同样的方式形成：利用的是一种处于高能量激发态的媒质，接着让这种媒质再以光的形式释放储存着的能量。然后，这种光在一个被称作“谐振腔”的器件里借助反射镜集束成光束。媒质可以是一种气体，一种液体或一种固体，这种类型的激光绝大多数也按照其媒质命名。例如：红宝石激光，钕玻璃激光，二氧化碳激光或色素激光。

众所周知，光子或称光量子的形成，一般是因为原子或分子从“激活的”里面含有许多能的状态“掉”进了能量匮乏的状态。这两个级之间的能量差，就是波或量子的能量。原子或分子不同的能态可能会有不同的原因：这样原子壳层的电子可以分布在不同的壳层上，高一点的这时候能就比低一点的多。若一个电子从较高的壳层上掉到较低一点的壳层上，就会形成一个光子。

另有一种可能是：分子振动。构成分子的原子之间会产生相对振动，原子数量越多，不同形式的振动模式就越多。若在它们之间过渡，或者返回静止状态，按量子力学的定律同样会发射出一个光子。

第三种能级是因旋转而形成的。分子会朝不同的方向旋转，从一种旋转过渡到另一种或过渡到静止状态这一过程中，也会有一个光子释放出来。

自然界中的一切都在竭力保持尽可能低的能态。例

如放在土丘上的一只圆球尽可能往下滚。原子和分子的行为也相仿。如果原子陷入一种受激状态，无论出于什么原因，它都竭力以发射光子的形式重新回落到基态。这发生在偶然的时间间隙之后——大多数在若干分之一秒之后，时间间隙的平均值可以从测量中获悉。由于回落这一过程在时间上是不能预言的，人们称之为"自发辐射"。

要是现在给一种媒质充能量，一个个原子或分子不一会儿就会因这种自发辐射而回落到基态，能好像不见了，然而人们并没藉此获得激光。若是激光还要有另一种现象：这里不仅有自发辐射，而且也可以人工引发退回到较低的能态的过程，方法是让相同能的光子与粒子碰撞。这一碰撞足以激活即"刺激"原子或分子发射一个自己的光子。这个过程因此叫做"受激辐射"——这一表达法已被载入激光的名称。

激光的原理这样说会变得一清二楚：先给一媒质充能量，然后利用受激辐射让它把这些能量重新作为光子释放出来，而且不是偶然地，而是受控制地释放。当然还有一个问题：只有当一个光子遇到一个处于受激的高能态之中的原子或分子时，才可以像刚才描述的那样促使粒子发射一个光子。通常会有更多的原子或分子处于低能态之中。它们吞噬到达的光子，并通过这种方式跃入一个更高的能级。但这样就不能产生激光。

为了构成激光，必须做到媒质中受激粒子要多于处于低能态之中的粒子。只有这样，许多粒子与其吞噬光

激光的原理

在一种普通的气体里，几乎所有的原子或分子都处在基态，即能量尽可能少的状态之中。只有少数一些被碰撞或者比如说被掉下来的光子而激活的粒子，处于较高的能态之中。不过，在特定的时间之后，它们又会重新回落到它们的基态之中。如果采取适当的措施——如射入光或放电——系统地将能量充到气体里，与此同时，光子又必须具有某种特定的完全合适的大小，气体的粒子就会吸收能量，并过渡到一种受激的状态。人们把这称之为能级反转。但不一会儿，它们又自行释放能量，并回到基态。为避免这样人们也可以通过重新用相同大小的光子照射它们的方式，强迫它们再释放能量。在激光里面，这样一种能级反转是有目的地营造的。顶端上放置的平行的反射镜，来回反射获得自由的光子。在这期间，它们与受激粒子碰撞，并迫使它们释放自己的能量。这样有越来越多的光子获得自由，于是产生了雪崩效应。由平行的光子构成的激光束，通过其中的那个半透光的反射镜向外发射。(参见下页附图)

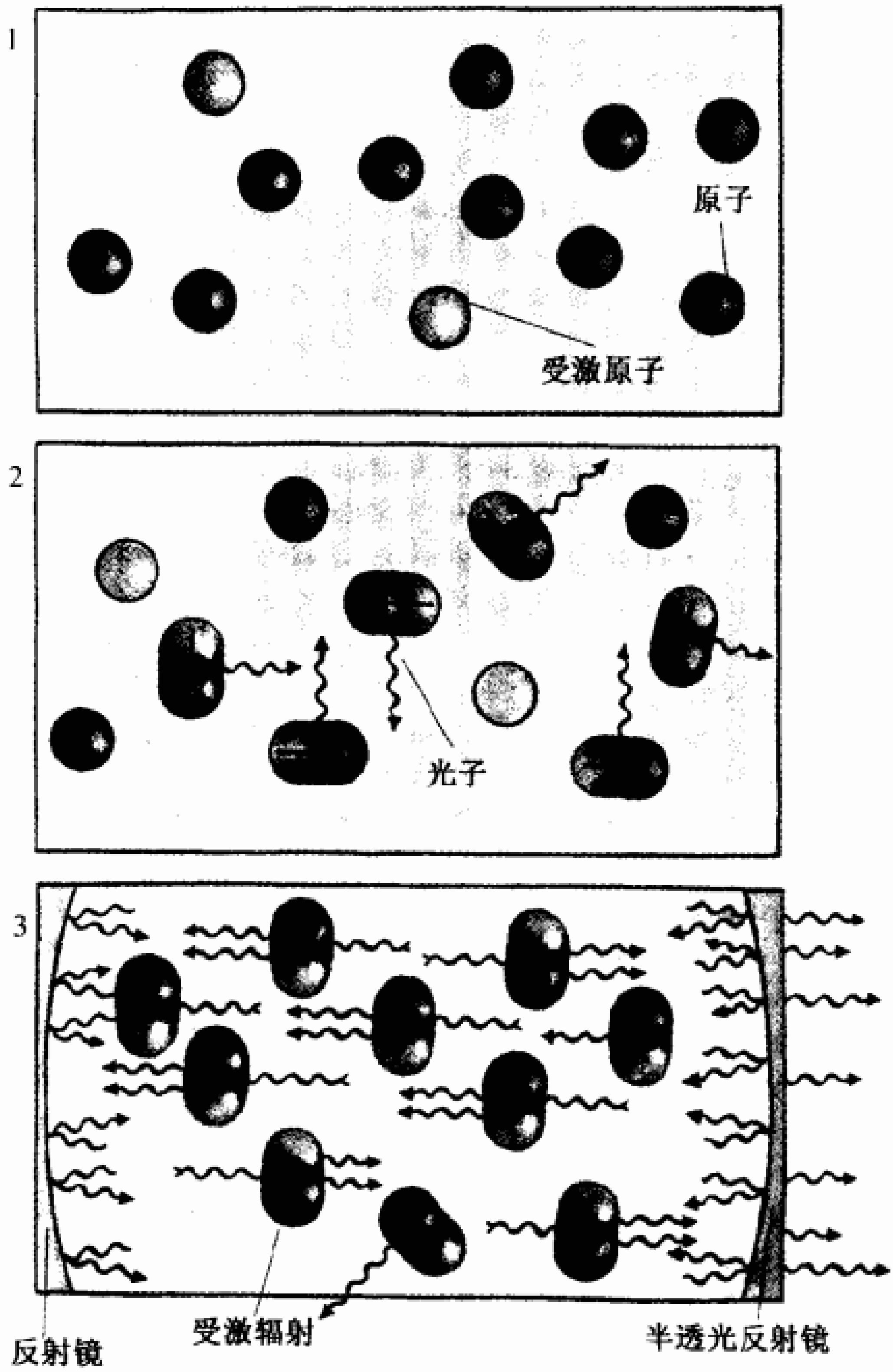
1. 在正常的情况下，一种媒质的绝大多数原子处于基态之中，只有少数偶尔受激。

2. 若往这个媒质里充能量，原子会因此受激，不一会儿又会以光子的形式释放这种能量（自发辐射）。
3. 由于光子的出现，受激原子被迫释放自己的能量（受激辐射）。顶端的两面反射镜将光集束。

子，毋宁将它发射出去。人们称这样一种能量分配为能级反转：高能级上粒子多，低能级上粒子则少。人们可以通过投入大量的能来达到能级反转。只有在这一先决条件之下，激光原理才发挥作用。

利用这种方式产生的光，虽然强烈，但尚未集束，而是朝各个方向辐射。真正的激光束要通过前面提到过的谐振腔才产生。它最简单的形式是由两面平行的反射镜构成的，激光媒质就处于反射镜之间。如果现在在媒质中因辐射而产生许多光子，反射镜始终只将那些纵向撞击的光子反射到媒质里去。朝一边往外飞的光子就消失了。但是，反射回来的光子在下一个回合中又撞上了原子或分子，并反过来激活它们发射光子。这一过程连续不断地进行，很快导致正叠加，这就是说，纵向撞击反射镜的光束越来越强。人们大多数在两边中的一边利用半透光的反射镜。然后，激光束穿过反射镜往外射，这一激光束是由借助受激辐射在媒质中产生的光子组成的。如何将能量充入激光，也就是说，如何为激光充电取决于媒质。最老的或许也是最著名的一种激光是 1960 年由迈曼（Theodore Maiman）推出的红宝石激光，它作为第一

附图



种激光(见附图)令世人惊诧不已。它的媒质是红宝石，即含有少量铬离子(Chromionen)的铝氧化物晶体。它浑身充满着光。实际上，这是一只环绕着红宝石、而且被同时点亮的棒状闪光灯。红宝石激光器的光是红色的。然而，今天用得更多的是钕玻璃激光器。就连这种激光器，光学上也是用闪光灯充电的。迄今为止，世界上最大的激光器，即美国加州利弗莫尔的新星激光器，及其计划中的第二代(National Ignition Facility；国家发射器)NIF都是按这一原理工作的。

气体激光器完全是另一种激光器。顾名思义，其工作媒质是由气体构成的，例如二氧化碳，氦氖化合物或氩。这里不能使用闪光灯充能量，而是通过电路输入能量。一般是往含激光气体的管子上输送高压电，以此造成类似日光灯管那样的气体放电。参与此事的电子与气体分子或原子相撞，从而激活它们。使用不同的气体，可以制造不同颜色的激光。氩激光器发射绿至蓝光，氦氖激光器发射红光，二氧化碳激光器发射红外光。

通过简单的气体放电方式输送能量与闪光灯放电完全一样，有那么个弊端，即它大多数只持续很短时间。所以这样一种激光器只能发射脉冲式激光。为了也拥有一种持续不断的辐射(持续线性激光器)，人们在最近的一些开发过程中使用诸如强辐射波来充能。它们被射入媒质，并在那里获得连续不断的气体放电现象。

气体激光器的另一种继续发展的方向，是从外部让一束电子束或离子束射穿媒质，并在此过程中与媒质粒

子相撞从而将能量传递给媒质。所谓化学激光器使用的又是另一种方式。在这里能量是通过化学反应输给媒质的。例如两种气体能够相互反应，于是反应能就获得自由。新产生的化合物以振动能的形式保留这种能量，这就是说，其分子振荡，并因此处于受激状态。

然而，不一定总是固体或气体，液体也能充当激光的媒质。在这一类型激光器里，特别著名的是色素激光器，在这些激光器里真正的媒质，即散发荧光的有机色素溶解于液体之中。这样的激光器大多数以光学方式充电，这就是说，射入光会激活分子。这种光若不是来自闪光灯，就是来自另一个激光器。在这里虚弱的激光器激活较强的激光器——这是一条有时也用于其他类型激光器的原理。

刚好不久之前流行另一种激光器，所谓半导体激光器。这些激光器的半导体层注入(掺入)了特定的原子，它们是被电压激活的。按照这一原理可以制造极小的激光器，例如用在CD播放机或激光打印机上的所谓二极管激光器。

大型的激光器还有其他的作用，如今它们的作用如此广泛，以至于似乎让人觉得，60年代初人们把激光器嘲讽为“寻找应用的发明”是荒谬的。当今，激光用于材料加工；在那里它们几乎可以切割、铣削、钻削每一种材料，除此之外，它们还能够对表面进行加工、淬火和印制符号。在焊接技术方面，它们几乎是必不可少的，尤其是在微电子技术领域，它们以最高的精度实现芯片电路的

联接。能量的高密度和激光的非凡的精密度，使得人们在最极端的条件下也能使用它们：它们可以加工诸如卫星系统技术中最小的部件；另一方面，它们甚至可以加工世界上最硬的物质——钻石。

即使在测量技术领域，激光器现在也是必不可少的：用它们测量距离，在隧道建设、土地测量和建筑工程中十分有益，甚至月亮与地球之间的距离，也是借助一面由宇航员架设在月球表面的反射镜反射的激光测得的。激光会被散布在空气的杂质和大气层中的特殊分子散射——因此在现代科学里，激光可用来监测和预测环境变化。例如臭氧层空洞的变化一部分就是用激光来测量的。工业界用激光来监控流程，因为它们能察觉形状或温度最细微的变化。汽车制造者利用全息图、三维激光相片，检测车身的振动情况；计算机研究人员在此基础上，开发新的容量更大的数据存储器。

没有量子物理学，当今世界似乎也就不可能拥有时间测量的高精度，比如时间测量的高精度使卫星导航成为可能。要把时间定得如此精确，必须使用同样是以量子力学效应为依据的原子钟。当今用得很多的铯原子钟是由一个微型的炉子构成的，在炉内铯金属得到蒸发。这样就造成了一股由带电的铯离子构成的电流，它穿流过一根抽真空的管道。管道末端的磁力，只将具有某种完全特定的能态的铯离子，引入所谓的谐振腔。它们在谐振腔里面被人们用频率为 91.926 317 7 亿赫兹的微波照射。它们正好能够吸收这一频率，即能够吸收辐射的

离子,并因此而被激发。这时,第二股磁力将离子引入一只探测仪。如果到那里的离子不多,电子控制电路开始活跃起来,控制电路重新调谐微波频率,直到探测仪里离子的数字重新达到最高值为止。利用这种极为精确的方式,频率将保持稳定,然后驱动钟。

现代激光的另一个重要的应用领域是医学。尤其在实施一些采用内窥镜的非介入手术时,激光是止血不可缺少的方法。当然在实施常规手术时,它也有此功能,但此时它更多的是,用于连接血管。激光是目前眼科手术的标准仪器,它们去除角膜层,矫正结晶体或重新焊接视网膜。在治疗皮肤疾病时,使用的主要是柔软的激光,去除胎记、疤痕、纹身或肉赘则使用较强的口径激光器。

最后一点,但并不是最重要的(一点)是军用的大型的激光器。特别是冷战时期,美苏两个超级大国致力于制造越来越庞大的激光器,希望以此来击退对方的导弹。美国以“星球大战”或“SDI”为名,推出了一套自己的发展计划,据说该计划其中耗资数百万美元以发展全球激光系统和X射线激光。目前,这方面的劲头有所减弱,但远远没有停止。面对这一应用浪潮,人们可以大胆地说,作为量子力学的仪器的激光器,实际上改变或影响了许许多多人的生活。其发展的势头尚未终止。人们从中希望有朝一日能够变光学计算机为实现,此类计算机不再用电子,而是用光子来计算,不仅体积更小,而且速度更快。激光不久也将产生新一代内存比目前大得多的数据存储器。最后,激光对艺术家而言也是展示未来的媒

质，这一媒质将凭借其技术上的可行性敞开新的创造自由。

超　导

荷兰物理学家开默林-昂列斯（Heike Kamerlingh-Onnes），1911 年发现了一种他本人不能解释的罕见的现象：每当他把汞冷却到快要接近 −269℃时，汞就会突然完全失去其电阻，并无损耗地传导电流。1913 年，昂列斯获得诺贝尔奖，当然不是因为发现这一被称之为超导的现象。人们渐渐地确定，大约有 10 来种元素和 100 多种合金具有类似的反应。然而，所谓的临界温度始终只是高出−273℃这个绝对零度那么几度，高于临界温度超导便中止。绝对零度用 0K 来表示，它标志着原子和分子的各种热运动在此点停止。为方便起见，人们宁可用开尔文（K）来表示低温。汞在 4K 时产生超导。三位研究员巴丁（John Bardeen）、库伯（Leon Cooper）和斯里弗（Robert Schrieffer）在 60 年代末提出了一种旨在解释这一奇特现象形成的量子力学理论。该理论按这几位物理学家姓氏的头一个字母叫做 BCS 理论，并于 1972 年荣获诺贝尔奖。

由于发生超导现象的温度如此之低，冷却材料时必须使用液氦。由于费用昂贵，只为极少数实际应用开绿灯。如加速器实验、聚变装置或拍摄 CT 中的超导线路。超导这一主题当时看来已经讲完，而且说清楚了。

因此，当瑞士人米勒(K. Alexander Müller)和德国人贝德诺尔茨(J. Georg Bednarz)，1987 年 3 月在纽约美国物理学会举行的一次大会上，宣布发现了一种较高的在 35K 时就产生超导的材料时，引起了极大的轰动。这里涉及的是一种陶瓷类物质，镧钡铜氧化物，它具有一种结构复杂的晶格，属于铜酸盐族。他俩因这一发现于次年获得诺贝尔奖。随后，人们即刻在全世界范围内开始寻找类似的临界温度更高的物质。不久，便真的有人找到了 90K 时就产生超导现象的化合物。在这之后，又有一些其他成功的报道。汞-钡-钙-铜氧化物以 135K 的临界温度保持着现在的纪录。这远在液氮的温度(77K)之上，使利用正常的氮冷却方式就达到超导成为可能，所以也就没有必要再去使用那昂贵的液氦了。和往常一样，也有传闻说，有朝一日会找到一些甚至在通常的环境温度下就能超导的材料。

蕴藏在奇特的超导现象背后的物理机理，至今尚未完全得到澄清。巴丁、库伯和斯里弗，在他们的 BCS 理论中，假设电子在超导体里形成所谓的库伯电子对，与一个个电子相反，库伯电子对不可能与其同类相撞，也不在导电晶体的晶格缺陷中散开。因此它们在向前移动时绝不会碰上阻抗。

一些已知是带负电的电子，在不相撞的情况下，竟然能结成对子的依据是量子力学的效应，该效应只在固体，确切地说，在晶体中出现。金属内部的晶体晶格是由裸原子即离子构成的，它们已把自己最外面的壳层电子当

作自由电子释放。简单地说，可以想像，电子从这些离子旁边经过时通过电磁引力在短时间里稍稍移动了它们的位置。这种短时的晶格扭曲在固体物理学里叫做声子。这里涉及到的是晶格振动，根据量子力学波粒二重现象，这种振动也能视为粒子。这些声子，可以说，造成小的正电荷区吸引其他的电子，以此帮助构成对子。BCS 理论能很好地解释金属中的超导，这里当然只是简明扼要地对此作了介绍。

但是在解释新发现的铜酸盐高温超导时，它却仍然无能为力。因此从这以来出现了各种截然不同的理论。到现在为止还没有哪一种理论能最终有把握地得到确认。目前，最看好的看来是由来自加利福尼亚的斯卡拉皮诺(Douglas J. Scalapino)和来自伊利诺斯的平斯(David Pines)发明的自旋波模型。这一模型说明，在受迫载流子穿过超导体时，晶格原子的自旋定向沿途倾转。形象地说：载流子在它的尾流产生了磁干扰，即自旋波，这一尾波的吸力会吸引另一个载流子，于是两者组成库伯对。基尔特莱(John R. Kirtley)和崔伊(Chang C. Tsuei)这两位 IBM 研究员，看来现在已经为这种自旋波理论的正确性找到了实验证明。

然而，精辟的理论方面的解释对实践者来说只是次要的。他们目前在十分紧张地按技术规范制造结构复杂的材料，特别是对这些材料进行加工。由于陶瓷类材料加工的晶体非常脆弱，这就复杂了，而且需要在加工工艺方面多作努力，例如从中制造出纤细的长丝。这是将超

导运用到工业之中的基本前提之一。另一个难题在于，铜酸盐的结构是层状的，因而只能在这一层面上传导电流。人们通过让微薄的、修正匀称的阶层在根基上生长的方式，回避了这个在多晶体构成时严重影响电流传输的问题。通过这个办法，可以得到精细的平整的超导分子层面。尽管这些在千分之一毫米数量级上的薄膜厚度只承受较低的电流强度，但它使一系列产品，尤其是滤波器、耦合振荡器和电信子系统成为可能。目前没有哪一个市场的发展速度比后者更快。超导成分或许能大大提高技术容量，因为元件可以微型化，噪音在大大降低，传输质量会改善几个数量级。因此便有各种各样的估计，比如移动通信方面，通过在智能基础网站使用超导频道容量能就可以翻几倍。此外，接收站较高的灵敏度可以降低手机所需的发射功率。这会降低能耗——机器不依赖于网络的时间就更长，也会减少辐射对用户的影响。

对于在通信卫星上使用超导器件来说，尽管要有必要的冷却装置，但微型化意味着节省重量和体积，它还能以此减少有效负载。据说，一个完整的传输系统将首次在国际阿尔法（Alpha）空间站进行测试。在那里可从实践中看出，哪些是系统重量和性能的优点。

超导在电力和能源领域的用途有好几种：首先当然是长距离无损耗的电流传输。在人口密集的地区，铺设在地下的超导电缆能满足日益增长的电力需求。通过降低损耗的方式，也许可以弥补因对电线作必要的冷却而提高的费用；按专业人员估计，现在毕竟约有 15%的传

输功率是因线路电阻而损失的。这就是说，它们转换成热损耗。超导电动机能比传统的装置更有效地工作。目前还不可能直接存储电流，但对此或许超导也是适宜的。在超导线路上电流完全可以无损耗地流动。因此有人设想有朝一日制造大型的线路，给它们“充满”永远会在它们中间流动的电流，只在必要的时候抽取它们。一种令人神往的可能性，现在因这些新的工艺材料而逐渐向我们靠近着。

另一种使用超导储能的可能性是大型飞轮，它们在超导的无摩擦的轴承上转动。比如说用廉价的夜间电流启动这些飞轮，然后它们高速旋转。需要的话，耦合一台发电机，它使转动能转换为电压。同样的无摩擦运动的原理现在用于磁悬浮列车。超导体也许能在这里降低经营成本。在宇航技术方面，预计超导体也许同样可以派很多用处。由于宇宙空间寒冷，甚至可以设想放弃使用费用昂贵的冷却系统。所谓的 Squid（超导量子干涉器件）是一种极其敏感的磁探测仪，它可以测量人体内部微弱的磁信号。类似 EEG（脑电图）那样，人们可以借助 Squid 证实源于心脏和大脑的励磁电流，并对它们的变化进行分析。通过这种方式，人们希望对一些特定的癫痫病例的脑部活动情况有所了解，并以此找到新的治疗方法。

医疗技术中的量子物理

Squid 现在还是非常神秘的测量仪器，它们主要用

于科研，不然就是在特殊情况下才使用，相反 CT 机如今已是医学诊断的常用器械。它们至少有两个方面是以量子力学为依据的：一、用于制造那些极强磁场时所需的超导线路；二、通过病人体内以此种方式拍摄到的生理过程。

在拍摄 CT 时，可以说，病人被磁透视，与此同时，人们充分利用了一些原子具有磁的特征这一事实。氢原子在人体内部的反应也和微量磁铁一样。

病人躺着被推入一个由超导线路造成的强大的磁场中。受检人体内的氢原子沿着这一磁场方向排列。仅这么做还不足以获得一幅图像。为此，在磁场列队的原子必须先获得一股“推力”。这就造成射电波脉冲，它将氢原子核提到一个激发态的能量级。现在，面对磁场的原子不再处于静止状态，而是围绕着磁力线旋转，直至它们通过能量子反射——在这种情况下一个辐射波量子——又反射附加的能。按量子力学的定律，这不是在一个精确的、可预言的时间点发生的，而一般约在随后的一秒钟之内。高度敏感的测量仪器记录射出的量子，然后将它输入计算机，从数十万数值当中计算机构成一幅图像。在这里有三种现象扮演了重要的角色：第一，磁场并非到处都一样的强，而是渐渐地从一边到另一边攀升的。短波来自强度较高的区域，较长一点的波来自其他的范畴。这样可以分清各种波的来龙去脉和相关原子的位置；第二，每一幅层面图都是经多次“曝光”形成的，而每次曝光的方向都不同；第三，计算机可以从射出波的强度当中算

出相关躯体范围内会有多少氢原子。

然而，方法可能还有很多很多：比如说，受激原子又是怎样快速将吸收进来的能反射出去的，这取决于它们的周围环境。例如完全固定在细胞组织中的氢原子的时间比相对松散的长。这种所谓的衰变时间的长短表明，哪一种细胞组织必须受到观察。

通过复杂的计算方法，计算机从吸收的信号中探明层面 X 线图像，即所谓的层析 X 射线摄影图片。它们不仅显示组织器官，而且也显示细胞组织的病变。例如肿瘤非常明显地从周围脑组织中凸现出来。新近甚至能够在妇女的乳房中确诊仅仅只有几毫米那么小的乳房癌肿瘤先兆。这就能够比以往更早地诊断这种疾病。由于血红蛋白中铁原子的磁反应，目前已经可以确定与血红蛋白相关的氧原子的位置。这样就可以查明体内哪个部位——比如在大脑的哪个区域——特别需要更多的氧，人们就会知道，在一些特定的感觉过程中，大脑的哪些区域会兴奋起来。

另一种透视方式是利用特定元素的特性，释放放射性辐射或其他粒子。辐射大部分穿透细胞组织，会被安装在外面的探测仪记录下来。这种诊断，比如说，在甲状腺病例中早就用上了。其他的粒子，如在体内发射的正电子连同无处不有的电子湮没成微量的能闪光，它们同样被外界的计算仪器记录。这种方式叫做正电子-放射-层析 X 射线摄影（PET），它不仅在对大脑进行研究时，而且在确定病灶时也起辅助作用。

微电子学和数据存储

如今，电子计算机与我们的日常生活如此息息相关，已经不再会有人想到将它们与量子力学这一奇异的世界联系起来，然而事实上计算机工作方式的根本依据是量子力学。其中的原因在于不同元素表层电子的排列。

如同前面展示过的那样，对于一个原子来说，拥有 8 个外层电子是一种极为有利的稳定状态。所以在化学当中，那些其最外层电子数互补的元素，特别容易相互反应。这一基本定律不仅适用于化合物，而且也适用于晶体的构成。原子在它们中间按某种有规律的结构排列，而且优先作同样的排列，以达到每一个原子有 8 个外层电子。

在元素周期表中相互排在一起的碳、硅或锗，各有 4 个外层电子。由于它们在晶格中与各自的邻居相连，所以每个原子分别与各个邻居平分电子。于是就产生了这种极为稳定的，其中每个原子被 8 个电子包围的钻石结构。

通常这三种元素中没有哪一个能传导电流，但事实上它们被称为半导体。因为外层电子当中有一个有时会得到一个小小的推力，然后从晶格结构中跳出来。

这种推力的形成可能是因为晶格的振动，也可能是因为射入的光子，这就像在光电效应之中所发生的那样。像这样的高能电子现在能够与晶格平行地自由移动。它

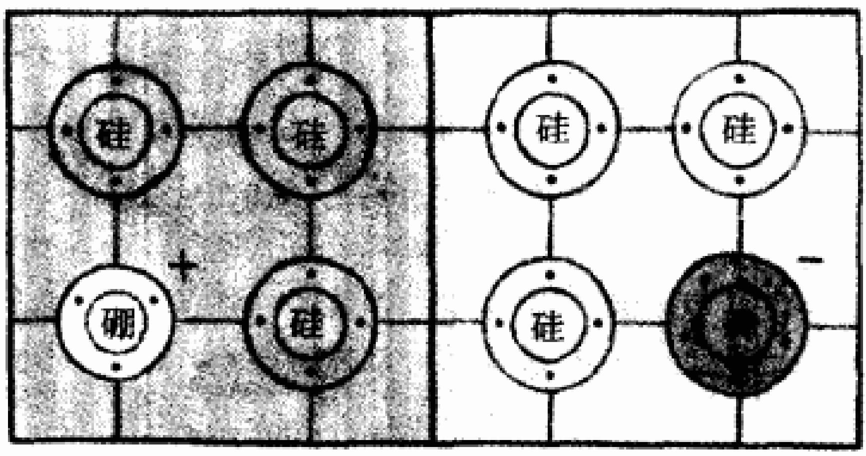
半导体中的晶体结构和掺入外来原子

晶体中的每一个原子都在争取对它们有利的能态，只有当它们最外面的壳层有了8个电子时，这种状态才算达到。然而，每一个硅原子只有4个外层电子。因此，它分别与4个邻近的原子共同利用1个电子。通过这种方式形成了一个有规律的晶格。由于所有的电子连得比较紧，半导体硅在室温条件下不会导电。硼原子只有3个外层电子。硅晶体中的几个地方一旦掺入硼原子，就会出现电子匮乏的现象，因为邻近的硅原子现在接触到的已不再是8个外层电子。这些电子空当在半导体技术里叫做空穴，它们像正载流子一样移动穿越

作为载流子工作，保障电流畅通无阻。半导体是因这种现象而得名的：它们不作为绝缘体，也不完全作为导体，而是作为中间物工作。

计算机芯片原则上是由这几种半导体构成的，用得最多的是硅，在特殊情况下使用锗。现在，用一个单个的化学元素还不能够制成逻辑电路。所以，人们找到了能让半导体传导电性能变好或变坏的办法。只有从传导性能参差不齐的材料的组合当中，才能设计出一些计算或储存的元件。

晶体。一个掺入硼的半导体，可以传导哪怕是少量的电流。如果掺入磷原子，输出状况就恰恰相反。磷原子有 5 个外层电子。如果它在硅原子之间，它可以与这些邻居平分其中的 4 个，第 5 个没连接在一起，因此能在晶体里面到处漫游。因此一个掺入磷原子的半导体也能传导电流。



硅发生变化是因为一个晶格中的原子被其他原子取代，专业人员称这一过程为“掺入”。为此，一方面要用有 5 个外层电子的磷，另一方面要用有 3 个外层电子的硼。如果磷原子在这些硅邻居之间，材料的传导性能就提高，因为有附加的外层电子传输电流。如果向晶体结构注入硼，那晶体结构在这些地方可以说有“空穴”，因为那里缺少在晶格中的电子。人们可以像观察带正电的载流子那样，观察这些空穴，因为每次都少一个作负载的电子。它们也能漫游，因此能保障电流穿过这些材料。

在诸如晶体管或栅这些电子元件当中，现在有三种不同的材料在超薄的层面和线路上合并，使得它们作为电子或空穴的逻辑电子元件工作。从无数个这样的电子元件的相互作用当中，最终形成了让我们的计算机运算的芯片。

半导体不仅只在计算机里起着至关重要的作用。几十年后，它们还将承担全球的供电任务，而且是以太阳能电池的形式。目前在屋顶或试验性电站中经常可以见到许多小型仪器，在这些小型仪器中会产生由光电效应而产生的电流，也就是说通过太阳光子将半导体晶格中的电子激发出来而产生电流。通过这种方式可利用太阳光直接发电，这可能引起全球能源供给的一场革命。这种原理是简单的，比如说长期以来，就利用太阳能桨叶为卫星提供能量。不过在费用方面，必须与那些已经投入使用的常规能源载体竞争的地球上，太阳能还是太昂贵。另有一些问题是，太阳只是白天才出来，夜晚也要用电，这就必须要有一种能源贮存器来平衡供给。目前还有一系列技术经济问题，这些问题不久无疑将得到解决。最迟到这些古老能源载体耗竭时——专家估计，这将是一二百年以后的事——能源供给将转为太阳能。

量子计算机

近 10 年来，计算机工艺技术的进步如此之大，以至于现今计算机的容量约已达到了 60 年代它们的祖先的

100 万倍。用微软公司总裁比尔·盖茨的话来说："如果通用汽车公司的工艺技术发展同计算机工业一样突飞猛进的话，我们今天驾驶的汽车只值 25 美元，行驶 100 公里只需耗油 1/5 升。"

目前，计算机微处理器的结构仅为人的头发丝的百分之一那么细，它继续朝着更小的规格和更高的密度发展。不久将会达到原子的数量级，量子力学的定律将起作用。因此，全球范围内的科研人员都在思索一个问题，是否不仅仅在理论上可以设计出一种直接利用量子力学规律的计算机，一种所谓的量子计算机。

原则上讲，这是可能的。每一台计算机的依据是将信息拆成极小的份额，一个接一个地加工处理。这就是人们所讲的比特(Bit)。比特是最小的信息单位，用量子力学的术语来说，就是一个信息量子。现今的计算机按二进制工作，这就是说，它们只认两个数字：0 与 1，或者是：是与否。所有运算程序，无论它们有多复杂，都是通过操纵这两个数字来进行的。如果还记得原子结构的话，那从中就会发现类似的结构：最外面的那个壳层的一个电子可能处在基本状态之中——这相当于 0 这个数字；也可能是激活的，处在高一级的轨道上，这相当于 1 这个数字。这一事实使开发量子计算机成为可能。

在处理器里面，数字 0 和 1 必须是能够调节的，它们必须是可操纵的，这就是说，必须能够让它们相互连接，它们必须是可读的，这样可以查看结果。常规的电子计算机都借助以下三个所谓的逻辑连接来完成这两个数字

之间的运算:"和"、"或"与"否"。一切计算步骤都是由它们组成的。

比如说,我们可以将1输入计算机动作,想像成是在利用一道精调了的激光,将原子最外层的电子提到了较高的轨道——激活了原子。如果想把1转到0,或者相反,就用能量来照射原子,这种能量对于较低的和激发态之间的过渡是必要的。若原子事先已被激活,它就因此受激释放它的能量(这与激光一样),并回落到基本状态:1变成了0,一个可以记录的光子被射出。若原子先前处于基本状态,它被激光脉动提升,从0当中变出1。在计算机技术术语里,这样一种装置叫做"触发器"。实际上,可以为各种逻辑运算找到合适的、能在量子计算机当中对应的方法。类似这样进行工作的,还要借助合适的射入激光脉冲把信息读出来。

现在,量子计算机显然有个特点:根据量子力学的规律,状态可以叠加,这就是说,有一些既处于基本状态,又处于激活状态的电子。这样,一成不变的0和1就不复存在,而只有原子是代表0或是代表1的概率。想像一下在现代计算机中,如果出现一个量子比特,而它是处于0和1之间的叠加态时,这种情况意味着一个错误,但在量子计算机里则恰恰相反,它可以开拓计算的新领域。有好几位科学家现在已经证实,一台可以处理叠加态信息的量子计算机,原则上可当作通用计算机使用。

所有这一切真是娓娓动听:现在有一系列大难题,到目前为止,它们一直阻碍着人们制造出一台真正的量子

计算机。其一，元件之间的相互“连线”复杂。这就是说，原子必须能够相互交流与各自状态有关的信息，人们必须将量子比特从一个原子传送到下一个原子。这一点现在——尽管有一些利用包括 EPR 怪论在内的富有创造力的试验——仍旧遇到很大的困难。

另一个根本的问题，是这样一种计算机的可信性。由于原子的状态，在一定的时间内以一定的概率转换，必须保证运算期间不出现事先未预料到的转换。即使在常规计算机里，也时常突发一些错误，那里的解决问题的方法是在计算程序中安装长期的监控装置。比如在作这样一些监控时，组成和检验了有关某个数字各个比特的横加数，看它是否稳定。这样一种方案在量子计算机里是不可能实现的。海森堡的测不准关系和哥本哈根学说表明，量子状态是在测量的一瞬间变化的。为了控制而测试一切是否正常运转，也许是这么一种将使计算机的状态急剧改变的测量。当然，不久之前也有人为此提出了一个解决问题的办法。通俗地说，它的依据是，人们虽然在测量状态，但没仔细去看它，这就类似一只“量子看家狗”，当它遇到险情时，虽然呼噜呼噜作响，但不咬人。如此一来，量子物理学里现在不仅有猫和鼠，而且新近又有了狗。

如果量子计算机真的能成为现实的话，这就不仅仅是纯粹的游戏。今天已经有一些专家提出了计算问题，量子计算机也许能轻而易举地解决这些问题，而常规计算机则要为此工作几年或者无能为力。一个目前具有很

大实用意义的问题，是将一些大数字的“因子化”：如同剑桥马萨诸塞工业学院的劳埃德（Seth Lloyd）介绍的那样，人们可以在量子计算机里演示几个比特的叠加来模拟声波的叠加。0 或 1 听上去就像一个单一的声音，一种如同管风琴那样的叠加。他引用了美国国际商用机器公司（IBM）研究员肖尔（Peter W. Shor）的话，肖尔认为，量子计算机的这种交响因素，使它能够迅速地将硕大的自然数字拆分成各自的因子。他相信，一个大数字的因子表现得像一段音乐那样清晰，同其他乐器相比，这一段音乐是由小提琴、中提琴和大提琴以八度音同时演奏的。百位数和多位数数字的因子化，在数据安全保管中有重要意义，因为在加密技术的现代化的手段中将使用这样的运算方式。

最终量子计算机能够自己模拟使它运行的各种原理：劳埃德认为，量子计算机的主要作用是能够模拟量子力学的机制。如此一台计算机用 40 比特、分大约 100 个步骤就能同样做到——经典计算机用几个兆的比特、花几年的时间所做到的事。

附　录

术 语 释 义

吸收(Absorption)

例如原子吸收粒子或量子

激发(Anregung)

粒子或原子过渡至一种较高的能源状态。引起激发的原因大都是因为吸收了量子。

反物质(Antimaterie)

与“正常的”物质对立的物质，这就是说，它可以消灭物质。每一个粒子都有反粒子。假如它与相应的粒子相撞，两者就引发能量电闪。反物质存在与宇宙射线和特定的放射性元素的射线之中，除此之外，它现在通常是在大型加速实验室生产的。

原子(Atom)

早在公元前420年，德谟克利特(Demokrit)就正确地

猜测到，万物都是由原子构成的。如今，人们知道原子是由核和壳层构成的。核是带正电的质子和不带电的中子的聚合体。带负电的电子围绕核旋转，其数量与核里面的质子的数量一样多。

停留概率（Aufenthalswahrscheinlichkeit）

在特定时间、特定位置找到粒子的统计概率。

玻色子（Bosonen）

自旋数为整数的基本粒子，但它们不遵循泡利原理。

折射（Brechung）

由于不同媒质中各种波具有不同的传播速度，所以在两种媒质之间的界面它们会有速度量值和方向的变化。

角动量（Drehimpuls）

用于衡量一个旋转物体争取继续围绕轴心运动的尺度。如果是基本粒子，角动量也叫自旋。

电子（Elektron）

电子是基本粒子，各种化学元素的原子壳层都是由基本粒子构成的。它载着单位电荷，其电荷数正好与质子的相仿，但符号相反。因此人们常说，电子拥有－1 个电荷，

电子电荷甚微;迄今为止,人们不知道它究竟有没有空间扩张。其反粒子是正电子。

发射(Emission)

比如从原子里发射或辐射粒子。

费米子(Fermionen)

自旋数为$\frac{1}{2}$的基本粒子,它服从于泡利原理。

频率(Frequenz)

每一单位时间里振荡的次数。绝大多数是以赫兹来作单位,即表示每秒的振荡数。波动的频率越高,所属粒子的能量越高。

半导体(Halbleiter)

导电能力介于金属和绝缘物之间的物质。在微电子学里面,一些半导体的导电能力因掺入杂质而得到提高。

半衰期(Halbwertszeit)

核蜕变时原子通过发射特定的粒子转换为其他的原子。例如铀-238(^{238}U)分好几步蜕变为铅-206(^{206}Pb)。任何哪一种蜕变都是不可预言的、偶然发生的。但是,如果同时观察许多原子,就能通过统计数来说明,百分之五十的原

子是经过多长时间蜕变的。就铀-238(^{238}U)而言，这一时间约达45亿年。其他一些元素的半衰期较短，如氚：12.3年，碳-14(^{14}C)：5730年，氪：10.76年，碘-131(^{131}I)：8.02天，铯-137(^{137}Cs)：30.2年。

干涉(Interferenz)

两种或更多的波动的叠加，与此同时，可能出现局部增强或减弱的现象。

离子(Ion)

通过丢失或得到一个或几个最外层电子来获得正电或负电的原子。

离子势阱(Ionenfalle)

借助电磁场将离子量级锁定得很小的实验装置。

激光器(Laser)

用来制造极为平行和均一的光线的仪器。

光量子(Lichtquant)

见 Photon 光子

中子(Neutron)

电荷为中性，质量大约与质子相同的基本粒子。它同质子一起构成原子核。

泡利原理（Pauli-Prinzip）

物理学定律，按此定律在同一系统中绝不可能出现，两个费米子的各种量子数都一致的现象。

元素周期表（Periodensystem）

按原子量及其化学特性排列化学元素表。它是由门捷列夫和迈尔各自独立发明的。

光效应（Photoeffekt）

也称光电效应。这种效应在于光子能够从一些固体的表层击发出电子。爱因斯坦因解释了光电效应而获得诺贝尔奖。

光子（Photon）

光子也称光量子，是电磁辐射的量子。它的物理特性时而像粒子，时而像波。

偏振（Polarisation）

粒子或波动在空间的定位，例如通过它的自旋方向，这时它按照外部电磁场而确定。

质子(Proton)

带正电荷,质量大约与中子相同的基本粒子。它同中子一起构成原子核。

量子(Quant)

在世纪交替之际,普朗克提出,能量不是持续地,而是"一份一份地",以所谓量子的形式出现的。后来,爱因斯坦成功地以其光电效应的学说阐述了这一理论。

量子数(Quantenzahlen)

用来表明原子特定状态的数字。它们有助于理顺原子模型的关系。

自旋(Spin)

基本粒子的角动量。它是经过量化的,只能取$\pm\frac{1}{2}$。

超导(Supraleitung)

超导是指一些物质,尤其是金属和结构复杂的陶瓷化合物,在超低温的状态中,突然失去所有电阻的现象。

波动(Wellen)

物理量在空间和时间上的周期性的变化。纵波的振动方向与传播方向平行(例如声波),横波则与其垂直(例如

水波)。

宇宙大爆炸(Urknall)

想像中的宇宙的起源,大约在150亿年前。当时宇宙的全部质量和能量都聚集在某一点。

普朗克常量(Wirkungsquantum)

普朗克常量是物理学普适常数之一,对量子力学具有重要意义。它说明粒子的能量与相关波频率的比例系数。普朗克常量是用h来表示的。

其 他 文 献

以下这些书籍可以推荐给那些想更深入地研究量子物理学这一专题的人，这当中有一部分是我曾经用作参考的——

费因曼(Feynman)/莱顿(Leighton)/桑茨(Sands)的那些著名的《物理学讲座》(Vorlesungen über Physik)，堪称物理学书籍中绝对的经典之作，是每一个有意刻苦进一步深入这一题材的人不可超越的顶峰。这些书是由慕尼黑奥尔登堡出版社(Oldenbourg Verlag, München)1988年用德语出版的。第三卷专门讲述量子力学。

在这之后，费因曼又分四讲就量子电动力学作了一次系列讲座。这几次讲座被冠以《量子动力学——光和物质的奇特理论》(QED, Die seltsame Theorie)的题目，由慕尼黑皮珀尔出版社出版(Piper Verlag, München)。同样这本书籍也因简洁的方式和通俗易懂的说明引起震动。

有关量子力学的通俗读物并不多见，而最佳读物中有一本是约翰·格里宾(John Gribbin)写的，书名为《寻

觅薛定谔的猫》(Auf der Suche nach Schrödingers Katze),1984年由慕尼黑皮珀尔出版社出版。

此外,还有以下一些书籍,它们至少言简意赅,部分地探讨了量子物理学——

埃德加·吕舍尔(Edgar Lüscher):《皮珀尔论现代物理学》(Pipers Buch der modernen Physik),1980年慕尼黑皮珀尔出版社出版。

埃德加·吕舍尔和其他合作者(出版商注):《物理学》(Physik),1971年由慕尼黑海因茨·莫斯出版社(Heinz Moos Verlag, München)出版。

默里·杰尔-曼(Murray Gell-Man):《夸克和美洲豹》(Das Quark und der Jaguar),1994年慕尼黑皮珀尔出版社出版。

下述作品主要介绍的是量子理论的哲学观点——

马丁·巴斯费尔德(Martin Basfeld):《从物质上认识精神》(Erkenntnis des Geistes an der Materie),1992年斯图加特自由精神生活出版社,哈尔登贝尔格版(Edition Hardenberg, Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart)出版。

约斯·费尔胡斯特(Jos Verhulst):《哥本哈根的光耀》(Der Glanz von Kopenhagen),1994年斯图加特自由精神生活出版社出版。

伊利亚·普里格尼(Ilya Prigogine)和伊莎贝尔·施

腾格尔斯(Isabelle Stengers):《与自然对话》(Dialog mit der Natur),1990 年慕尼黑皮珀尔出版社出版。

探讨量子物理学历史的书籍有——

K·西蒙尼(K. Simonyi):《物理学的文化史》(Kulturgeschichte der Physik),1990 年图恩法兰克福哈里·多伊奇出版社(Verlag Harri Deutsch, Thun Frankfurt)出版。

大卫·C·卡西堤(David C. Cassidy):《维尔纳·海森堡——生活与著作》(Werner Heisenberg, Leben und Werk),1992 年海德堡学术博览出版社(Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg)出版。

维尔纳·海森堡(Werner Heisenberg):《跨越边界》(Schritte über Grenzen),1984 年慕尼黑皮珀尔出版社出版。

《本世纪百名自然科学家》(Die 100 des Jahrhunderts, Naturwissenschaftler),1994 年莱因贝克出版社(rororo, Reinbek)出版。

对于所有真心诚意想钻研隐藏在量子力学背后的数学的人,现有 4 本只有物理学家看得懂的书可推荐——

格拉尔德·格拉维尔特(Gerald Grawert):《量子力学》(Quantenmechanik),1985 年威斯巴登论坛出版社(AULA-Verlag, Wiesbaden)出版。

马切罗·阿隆索/埃德华·J·芬恩(Marcelo Alon-

so/Edward J. Finn)：《量子物理学》(Quantenphysik)，1988年波恩爱迪生-韦斯里出版公司(Addison-Wesley Publishing Company, Bonn)出版。

A·S·戴维道(A. S. Dawydow)：《量子力学》(Quantenmechanik)，1963年柏林国营企业科学出版社(VEB Verlag der Wissenschaften, Berlin)出版。

西格弗里德·弗律格(Siegfried Flügge)：《量子理论的计算方式》(Rechenmethoden der Quantentheorie)，1965年柏林斯普林格出版社(Springer-Verlag, Berlin)出版。

这里提及的有关量子物理学的最新知识，主要源自基本上可以说非常有推荐价值的《科学博览》(Spektrum der Wissenschaft)杂志。